



Escuela  
Politécnica  
Superior

# Diseño, modelado y construcción de un robot pez basado en microcontroladores de bajo coste y servomotores



Grado en Ingeniería Robótica

## Trabajo Fin de Grado

Autor:

Christian Gimeno Navas

Tutor/es:

Santiago Timoteo Puente Mendez

Julio 2021



Universitat d'Alacant  
Universidad de Alicante





# Diseño, modelado y construcción de un robot pez basado en microcontroladores de bajo coste y servomotores

---

## **Autor**

Christian Gimeno Navas

## **Tutor/es**

Santiago Timoteo Puente Mendez



Grado en Ingeniería Robótica



Escuela  
Politécnica  
Superior



Universitat d'Alacant  
Universidad de Alicante

ALICANTE, Julio 2021



# Preámbulo

El objetivo principal del proyecto es trabajar en el diseño, modelado y construcción de robots para un lugar tan característico como el mar.

Para desarrollar este proyecto se ha hecho un estudio previo de cómo están actualmente las investigaciones en el campo de la robótica bioinspirada en peces para adquirir un poco de conocimiento en el tema.

Se ha hecho una selección de componentes necesarios para la construcción del robot como electrónica y materiales de construcción según unas características necesarias.

Para el diseño de las piezas se ha hecho uso de una imagen ejemplo de un pez.

En cuanto al movimiento, se han usado unas ecuaciones de movimiento carangiforme para modelar y calcular que onda se adapta mejor al diseño actual y los ángulos necesarios para adaptarse lo mejor posible a dicha onda. También se ha simulado para comprobar el correcto funcionamiento.

En el caso de la construcción, se ha detallado tanto el proceso de impresión 3D de las piezas como los diferentes pasos para el montaje completo del robot.

El control del robot se hace mediante una aplicación móvil desarrollada que se comunica con el módulo Bluetooth que lleva equipado el robot.



# Agradecimientos<sup>1</sup>

Este trabajo no habría sido posible sin el conocimiento adquirido en la carrera. Gracias a todos los profesores que me han enseñado año tras año.

También agradecer a mi compañero de piso Javier que me haya prestado su impresora 3D y que me haya enseñado los conocimientos básicos para la realización del proyecto.

Por último, agradecer a todos los familiares y amigos que me han apoyado durante toda la carrera. Decirles que han resultado un estímulo positivo constante.

Es a ellos a quien dedico este trabajo.

---

<sup>1</sup>Por si alguien tiene curiosidad, este “simpático” agradecimiento está tomado de la “Tesis de Lydia Chalmers” basada en el universo del programa de televisión Buffy, la Cazadora de Vampiros.<http://www.buffy-cazavampiros.com/Spiketesis/tesis.inicio.htm>



*Una inversión en conocimiento  
paga el mejor interés*

Benjamin Franklin.





# Índice general

<b>1</b>	<b>Introducción</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Marco Teórico</b>	<b>3</b>
2.1	Robótica marina . . . . .	3
2.2	Sistemas bioinspirados en peces . . . . .	4
2.2.1	Clasificación . . . . .	4
2.2.2	Orígenes . . . . .	6
2.2.3	Situación actual . . . . .	8
2.2.3.1	IPMC Robotic Fish . . . . .	8
2.2.3.2	FAC-I . . . . .	9
2.2.3.3	iSplash-I . . . . .	10
<b>3</b>	<b>Objetivos</b>	<b>13</b>
<b>4</b>	<b>Metodología</b>	<b>15</b>
4.1	Inventor . . . . .	15
4.2	Movimiento carangiforme . . . . .	16
4.3	Matlab . . . . .	18
4.4	ROS . . . . .	19
4.4.1	URDF . . . . .	19
4.4.2	Gazebo . . . . .	19
4.4.3	MoveIt . . . . .	20
4.5	Ultimaker Cura . . . . .	20
4.6	Arduino . . . . .	21
4.7	Android Studio . . . . .	22
<b>5</b>	<b>Desarrollo</b>	<b>23</b>
5.1	Elección de componentes . . . . .	23
5.1.1	Materiales . . . . .	23
5.1.2	Microcontrolador . . . . .	23
5.1.3	Cables . . . . .	25
5.1.4	Motores . . . . .	26
5.1.5	Módulo bluetooth . . . . .	27
5.1.6	Batería . . . . .	28
5.1.7	Breadboard . . . . .	29
5.1.8	Tornillos . . . . .	29
5.1.9	Lubricante . . . . .	30
5.1.10	Elección final . . . . .	30

5.2	Diseño mecánico . . . . .	31
5.2.1	Centro . . . . .	32
5.2.2	Parte superior . . . . .	32
5.2.3	Parte inferior . . . . .	33
5.2.4	Cabeza . . . . .	34
5.2.5	Cola . . . . .	34
5.2.5.1	Eslabón 1 . . . . .	35
5.2.5.2	Parte superior . . . . .	35
5.2.5.3	Parte inferior . . . . .	36
5.2.5.4	Eslabón 2 . . . . .	37
5.2.5.5	Eslabón 3 . . . . .	37
5.2.6	Piezas para el motor . . . . .	38
5.3	Diseño electrónico . . . . .	39
5.4	Movimiento . . . . .	40
5.4.1	Cálculo . . . . .	40
5.4.2	Comprobación . . . . .	44
5.5	Construcción . . . . .	45
5.5.1	Impresión 3D . . . . .	45
5.5.2	Montaje . . . . .	48
5.6	Control . . . . .	51
5.6.1	Código . . . . .	52
5.6.2	Aplicación móvil . . . . .	52
<b>6</b>	<b>Resultados</b>	<b>55</b>
6.1	Piel . . . . .	55
6.2	Pruebas en mojado . . . . .	56
6.3	Pruebas en seco . . . . .	57
6.3.1	Movimiento . . . . .	57
6.3.2	Golpes . . . . .	58
<b>7</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>59</b>
	<b>Bibliografía</b>	<b>61</b>
	<b>Lista de Acrónimos y Abreviaturas</b>	<b>63</b>

---

# Índice de figuras

2.1	Robot Seafly (Olcay, s.f.) . . . . .	3
2.2	Robot Nereus (Bowen y cols., 2008) . . . . .	3
2.3	Clasificación de los Body and/or Caudal Fin (BCF) (Bowen y cols., 2008). (a) Anguilliformes, (b) Sub Carangiforme, (c) Carangiforme, (d) Thuniformes. . .	5
2.4	Clasificación de los Median and/or Paired Fin (MPF) (Bowen y cols., 2008). .	6
2.5	Formación de vórtices (Triantafyllou y Triantafyllou, 1995). . . . .	7
2.6	Robotuna (Triantafyllou y Triantafyllou, 1995). . . . .	7
2.7	Vórtices formados en el nado del Robotuna (Triantafyllou y Triantafyllou, 1995). .	7
2.8	Ionic Polymer-Metal Composite (IPMC) Robotic Fish (Chen, 2017). . . . .	8
2.9	Explicación del movimiento de la aleta caudal (Chen, 2017). . . . .	8
2.10	Gráfica de velocidad frente a frecuencia de aleteo (Chen, 2017). . . . .	9
2.11	Aleta caudal del robot Fish-like Aquatic Cruiser (FAC)-I (Zhou y cols., 2008). .	9
2.12	Aleta pectoral del robot FAC-I (Zhou y cols., 2008). . . . .	10
2.13	Conexiones y funcionamiento del robot y la boya (Zhou y cols., 2008). . . . .	10
2.14	Aleta pectoral del robot FAC-I (Zhou y cols., 2008). . . . .	11
2.15	Aleta pectoral del robot FAC-I (Zhou y cols., 2008). . . . .	11
2.16	Aleta pectoral del robot FAC-I (Zhou y cols., 2008). . . . .	11
4.1	Solevación. . . . .	15
4.2	Extrusión. . . . .	15
4.3	Vaciado. . . . .	16
4.4	Derivar. . . . .	16
4.5	Evolución de la onda en diferentes instantes de tiempo (Liu y Hu, 2010). . . .	17
4.6	Gráfica del cruce entre el eslabón y la onda (Liu y Hu, 2010). . . . .	18
4.7	Imagen de una simulación en Gazebo. . . . .	19
4.8	Asistente de MoveIt. . . . .	20
4.9	Interfaz de Ultimaker Cura. . . . .	21
4.10	Interfaz Arduino. . . . .	21
4.11	Interfaz Android Studio. . . . .	22
5.1	Placa ELEGOO MEGA. . . . .	24
5.2	Placa ELEGOO UNO. . . . .	25
5.3	Cables dupont hembra-hembra, macho-hembra y macho-macho. . . . .	25
5.4	Micro-servos ZHITING SG90 9G . . . . .	26
5.5	DSD TECH HC-06 . . . . .	27
5.6	Pila alcalina de 9V . . . . .	28
5.7	Cable macho DC Power Plug . . . . .	28
5.8	ELEGOO mini breadboard . . . . .	29
5.9	MEIYJ M1 PA Phillips . . . . .	30

5.10 Grasa de silicona . . . . .	30
5.11 División del perfil del pez . . . . .	31
5.12 Pieza central. (a) General, (b) Superior, (c) Frontal, (d) Derecha, (e) Inferior, (f) Frontal seccionado . . . . .	32
5.13 Tapa central. (a) General, (b) Superior, (c) Derecha, (d) Frontal . . . . .	32
5.14 Pieza superior central. (a) General, (b) Frontal, (c) Superior, (d) Derecha, (e) Frontal seccionado, (f) Inferior . . . . .	33
5.15 Pieza inferior central. (a) General, (b) Frontal, (c) Superior, (d) Derecha, (e) Frontal seccionado, (f) Inferior . . . . .	33
5.16 Pieza cabeza. (a) General, (b) Frontal, (c) Superior, (d) Derecha, (e) Frontal seccionado, (f) Inferior . . . . .	34
5.17 Tapa cabeza. (a) General, (b) Superior, (c) Frontal, (d) Derecha, (e) Inferior, (f) Frontal seccionado . . . . .	34
5.18 Pieza primer eslabón. (a) General, (b) Superior, (c) Frontal, (d) Derecha, (e) Inferior, (f) Frontal seccionado . . . . .	35
5.19 Tapa primer eslabón. (a) General, (b) Frontal, (c) Derecha, (d) Frontal seccionado, (e) Superior . . . . .	35
5.20 Pieza superior de la cola. Pieza cabeza. (a) General, (b) Frontal, (c) Superior, (d) Derecha, (e) Frontal seccionado, (f) Inferior . . . . .	36
5.21 Pieza inferior de la cola. (a) General, (b) Superior, (c) Frontal, (d) Derecha, (e) Inferior, (f) Frontal seccionado . . . . .	36
5.22 Pieza segundo eslabón. (a) General, (b) Superior, (c) Frontal, (d) Derecha, (e) Inferior, (f) Frontal seccionado . . . . .	37
5.23 Tapa segundo eslabón. (a) General, (b) Superior, (c) Frontal, (d) Derecha, (e) Inferior, (f) Frontal seccionado . . . . .	37
5.24 Una de las dos piezas cola. (a) General, (b) Superior, (c) Frontal, (d) Superior seccionado . . . . .	38
5.25 Una de las tres piezas para los motores. (a) General, (b) Frontal, (c) Frontal seccionado, (d) Superior, (e) Inferior . . . . .	38
5.26 Esquema de conexiones de los motores . . . . .	39
5.27 Esquema de conexiones del módulo Bluetooth. . . . .	40
5.28 Esquema de conexiones de la batería. . . . .	40
5.29 Comparación entre la posición en cada instante frente a la onda durante un ciclo del error medio. . . . .	42
5.30 Comparación entre la posición en cada instante frente a la onda durante un ciclo del error mínimo. . . . .	43
5.31 Pantalla de MoveIt al ejecutarlo. . . . .	44
5.32 Resultado obtenido para todos los movimientos de las dos configuraciones. . . . .	45
5.33 Impresora Creality Ender 3 Pro. . . . .	45
5.34 Pieza central cargada en Ultimaker Cura. . . . .	46
5.35 Pieza central cargada en Ultimaker Cura. . . . .	46
5.36 Todas las piezas impresas. . . . .	47
5.37 Unión del segundo y tercer eslabón de la cola. . . . .	48
5.38 Cables pasados por todas las piezas necesarias. . . . .	49
5.39 Piezas con motores sin las tapas colocadas. . . . .	49

---

5.40	Piezas con motores con las tapas colocadas. . . . .	50
5.41	Todas las piezas de la cola unidas. . . . .	50
5.42	Cabeza y cola unidas a la pieza central. . . . .	50
5.43	Pez completamente montado. . . . .	51
5.44	Ejemplo de desplazamiento según el modo. . . . .	52
5.45	Lista de dispositivos vinculados. . . . .	53
5.46	Panel de control. . . . .	53
6.1	Rotura de la piel. . . . .	56
6.2	Pez flotando en el agua. . . . .	56
6.3	Hueco generado en las piezas sólidas. . . . .	56
6.4	Goteo de agua tras filtrarse en el interior. . . . .	57
6.5	Instantánea en el movimiento del pez . . . . .	58
6.6	Instantánea en el movimiento del pez . . . . .	58
6.7	Aleta caudal rota por el impacto. . . . .	58
7.1	Hueco generado en las piezas sólidas. . . . .	59

---



# Índice de tablas

5.1	Lista de costes. . . . .	31
5.2	Comparación entre la evolución de los ángulos durante un ciclo. (a) Error medio, (b) Error mínimo . . . . .	42
5.3	Comparación entre la evolución del error en cada posición durante un ciclo. (a) Error medio, (b) Error mínimo . . . . .	43
5.4	Simulación en Gazebo. (a) Pez generado, (b) Vector de gravedad . . . . .	44
5.5	Ejemplo de andamio. (a) Agujero con andamio, (b) Andamio retirado. . . . .	47
5.6	Cambio del túnel. (a) Túnel cuadrado lleno de andamios, (b) Túnel parabólico. . . . .	47
5.7	Información de todas la piezas impresas. . . . .	48
5.8	Montaje de un motor. (a) Pieza sin motor, (b) Pieza con motor. . . . .	49
5.9	Conexiones. (a) Fuera del robot, (b) Dentro del robot. . . . .	51
6.1	Filtración de agua en la funda. (a) Goteo, (b) Menos agua. . . . .	55
7.1	Concepto para mejora de aislamiento. (a) Pieza sin goma aislante, (b) Pieza con goma aislante. . . . .	60





# 1 Introducción

El océano cubre aproximadamente un 70% de la superficie terrestre según NOAA (2021). Es algo muy importante ya que controla el tiempo, regula las temperaturas y, por última instancia, es el pilar de todos los seres vivos que lo habitan.

El problema es que la información que se tiene de él es aún limitada. A la pregunta de cuánto se ha explorado del mismo se puede contestar de dos formas diferentes: el porcentaje de océano explorado y el de fondo marino cartografiado. Según algunos expertos se suele decir que el porcentaje de océano explorado es menor del 20% y de fondo marino cartografiado es del 10% a nivel global. Por ejemplo, Estados Unidos (EEUU) solo ha cartografiado el 35% de sus costas y océanos. Esto significa que aún nos queda por explorar más de la mitad del planeta.

Pero no es solo es cuestión de explorar, sino de entender todo lo posible sobre este mundo subacuático. Hay desde descubrimientos de nuevas especies hasta saber cómo se comportan las ya registradas.

Otra problemática es el envío de personas a las profundidades del océano debido a los riesgos que esto conlleva. Para evitar eso, lo más seguro es el envío de robots. En el caso del estudio de la fauna, cuanto más se parezcan los robots a los seres vivos subacuáticos, mejor se podrá estudiarlos sin perturbarlos.

La motivación principal para realizar el trabajo es el interés en el sector marino y en la robótica bioinspirada. Gracias a este trabajo, se adquirirán algunos conocimientos en dichos sectores.



## 2 Marco Teórico

### 2.1 Robótica marina

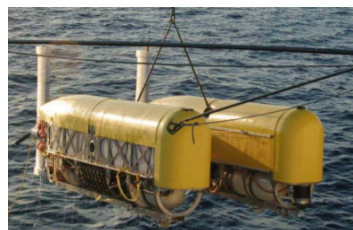
Son aquellos vehículos desarrollados para la exploración y estudio del océano. Existen dos tipos diferentes. Estos son:

- **Vehículos sobre el agua.** Son aquellos que solo se desplazan por la superficie sin llegar a estar totalmente sumergidos. Los más comunes de esta clase son los barcos aunque existen otros como las motos de agua y los hidroaviones. Por ejemplo, *SeaFly* mencionado en Olcay (s.f.) es un Unmanned Surface Vehicle (USV) desarrollado por *Beijing Sifang Automation* para la *Armada de la República Popular China*. Está diseñado para tareas de vigilancia y reconocimiento.



**Figura 2.1:** Robot SeaFly (Olcay, s.f.)

- **Vehículos submarinos.** Son aquellos que se mueven por debajo del agua sumergidos completamente. El vehículo más común es el submarino y que es tan importante que da nombre al conjunto. Un ejemplo de esto, nombrado en Bowen y cols. (2008) es *Nereus*. Este robot es un vehículo submarino híbrido (Remotely Operated Vehicle (ROV) y Autonomous Underwater Vehicle (AUV)) diseñado para tareas de investigación a profundidades de 11.000 metros.



**Figura 2.2:** Robot Nereus (Bowen y cols., 2008)

Dentro de estas categorías se puede dividir según el nivel de autonomía. Existen 3 tipos principales:

- **Unmanned Vehicles (UV).** Capaz de desplazarse de manera autónoma.
- **ROV.** Necesita que un operador humano maneje los controles.
- **Intervention Unmanned Vehicles (IUV).** Término medio entre los dos anteriores, es decir, se basa en un control supervisado o un operador determina las acciones a realizar.

También se puede dividir según el sistema de propulsión utilizado para moverse. Este determina los movimientos y maniobras posibles del robot y se clasifican en:

- **Hélices:** al girar produce una fuerza de empuje al desplazar el agua de adelante hacia atrás debido a la diferencia de presión producida.
- **Planeadores acuáticos:** Sirven para desplazarse desde la superficie hasta una profundidad deseada. Para volver a subir, se cambia su flotabilidad.
- **Inyección de agua:** Recogen el agua y una bomba la expulsa a través de una boquilla a alta presión provocando que se mueva en dirección opuesta.
- **Impulsores magnetohidrodinámicos:** Genera el movimiento del agua salada debido a la interacción de un campo magnético y la corriente que circula a través de él.
- **Tracción con el fondo marino:** Similar a la movilidad terrestre pero con menor peso debido a la flotabilidad del robot. También existen fuerzas de fricción más viscosas.
- **Sistemas bioinspirados:** Propulsión inspirada en la fisionomía de los peces o los cetáceos. Lo más común es el uso de aletas.

Este último es el objeto del estudio que se desarrollará a lo largo de este documento.

## 2.2 Sistemas bioinspirados en peces

### 2.2.1 Clasificación

Desde hace décadas los científicos e ingenieros están fascinados en como los peces se mueven tan eficientemente por el agua.

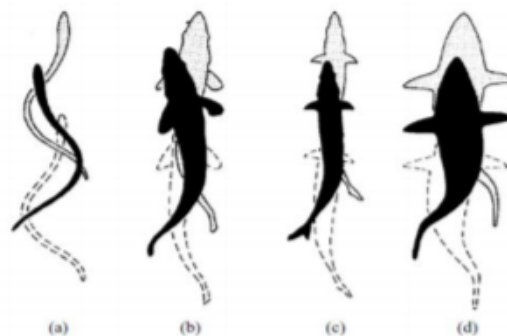
Existen dos formas de nado diferenciadas principalmente por las partes que se mueven durante la natación y que generan la propulsión necesaria para el movimiento. Estas son definidas en Faudzi y cols. (2014): la locomoción BCF y la locomoción MPF.

Los nadadores BCF constituyen casi el 85% de todas las familias de peces. Su forma de nadar consiste en curvar sus cuerpos formando ondas propulsoras que se extienden hasta la aleta caudal.

---

Estos pueden ser categorizados de diferentes formas distinguidas por el empuje generado, la longitud de onda, amplitud y la posición de la onda propulsora. Los cinco modos identificados hasta la fecha son:

- **Anguilliformes.** Son aquellos que usan todo el cuerpo para producir ondulaciones de gran amplitud. También tienen una habilidad única y es que son capaces de moverse hacia delante y hacia atrás cambiando el sentido a la propagación de la onda propulsora.
- **Sub Carangiforme.** Son similares a los anteriores pero su ondulación está limitada en la parte delantera del cuerpo y se incrementa en la parte posterior.
- **Carangiformes.** Son más rápidos que los dos anteriores ya que restringen la ondulación a la tercera parte posterior de la longitud de su cuerpo, pero el giro y la aceleración están restringidas debido a la rigidez del cuerpo.
- **Thuniformes.** Son los más rápidos de todos los nadadores BCF pero su movimiento no es eficiente a baja velocidad, durante los giros y en rápidas aceleraciones.
- **Ostaciiformes.** Sus movimientos son de oscilación pura. La aleta caudal se mueve como un péndulo mientras el cuerpo permanece prácticamente inmovil.



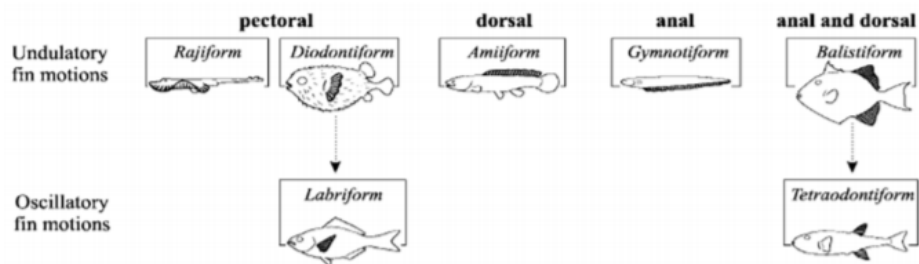
**Figura 2.3:** Clasificación de los BCF (Bowen y cols., 2008). (a) Anguilliformes, (b) Sub Carangiforme, (c) Carangiforme, (d) Thuniformes.

Por otro lado están los nadadores MPF que hacen uso de sus aletas medias y pectorales. Para esto se requiere de una serie de músculos para controlar las espinas de las aletas y conseguir movimiento y rotación.

La natación MPF está dividida en siete tipos según la aleta usada en el movimiento. Cinco de ellos están caracterizados por un movimiento ondulatorio, es decir, el movimiento es como el de una ola. Los otros dos se caracterizan por un movimiento oscilatorio, es decir, mueven las aletas hacia adelante y hacia atrás para generar el movimiento. Los diferentes tipos son:

- **Rajiformes.** Son aquellos que disponen de una aleta pectoral especial, muy larga, de forma triangular y flexible. Se pueden mover agitando las aletas arriba y abajo o generar un patrón de onda desde la aleta anterior a la posterior.

- **Diondontiformes.** Su propulsión no dista mucho de los anteriores. La diferencia es que usan una aleta pectoral ancha.
- **Amiiformes.** Mueven su aleta dorsal larga mientras el cuerpo está prácticamente rígido.
- **Gymnotiformes.** La única diferencia con los anteriores es la posición de la aleta. Este tipo de peces hace uso de una aleta anal.
- **Balistiformes.** Gracias al movimiento oscilatorio de su aleta dorsal y anal es capaz de desplazarse.
- **Labriformes.** Hacen uso de las aletas pectorales de forma ondulatoria.
- **Tetraodontiformes.** Son capaces de moverse gracias a una aleta dorsal y otra anal.



**Figura 2.4:** Clasificación de los MPF (Bowen y cols., 2008).

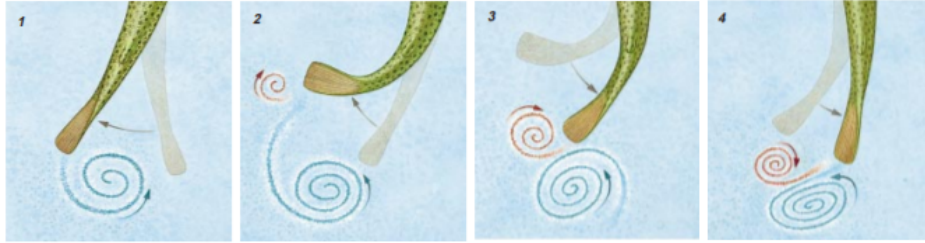
### 2.2.2 Orígenes

Como se explica en Triantafyllou y Triantafyllou (1995), llevaba tiempo hablándose de la eficiencia de los peces al moverse a través del medio acuático. Esto sería un gran avance en cuanto a navegación ya que se ahorraría una cantidad considerable de combustible. Pero no fue hasta 1995 que se produjo una conversación entre personas pertenecientes a Woods Hole Oceanographic Institution (WHOI) y Massachusetts Institute of Technology (MIT) que se planteó seriamente el realizar una investigación sobre el tema.

Se quería investigar la importancia de los vórtices durante la natación de los peces, para ello, se modeló lo más real posible un atún de aleta azul con un diseño de cola simple que imitaba el giro de la aleta caudal. Esto era complicado ya que los avances en robótica eran limitados en aquel entonces y más si querían replicar la continua y suave flexibilidad del animal.

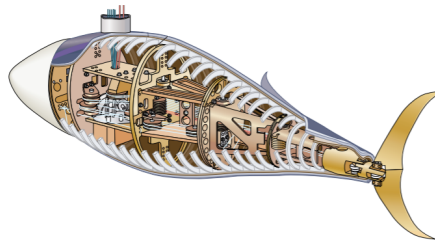
Un movimiento potente seguido rápidamente de otro en la dirección contraria produce un fuerte empuje repentino que siempre viene bien para abalanzarse sobre una presa o para un escape rápido. Como se puede ver en la imagen 2.5, el primer movimiento genera un gran vórtice (1) y el segundo, genera otro diferente contrarrotante al anterior (2,3). Una fuerte fuerza de empuje hacia adelante y una lateral manejable son el producto de cuando dos

vórtices coinciden para crear un chorro y ser empujados desde la cola debilitándose entre ellos (4).



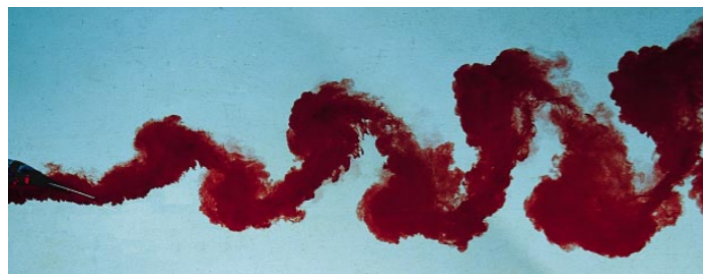
**Figura 2.5:** Formación de vórtices (Triantafyllou y Triantafyllou, 1995).

El cuerpo del *Robotuna* consiste en eslabones de aluminio conectados por bisagras. Seis motores, externos al robot, suministran la potencia para imitar la ondulatoria natación del atún real. Los sistemas de poleas y tendones son los encargados de transferir el torque de cada motor aislando el movimiento de cada eslabón. Los motores están instalados en un carruaje que se desplaza por fuera del agua. También tiene una estructura de vigas que permiten que la piel hecha de espuma y lycra quede sujeta durante la flexión de la cola.



**Figura 2.6:** Robotuna (Triantafyllou y Triantafyllou, 1995).

A pesar de conseguir resultados satisfactorios no se acercaba a la realidad. Esto causó la admiración de la gente involucrada en el proyecto por el pez real. Era imposible competir contra un sistema optimizado por millones de años de evolución. Lo bueno es que sirvió como base para futuras investigaciones en el campo de la biomimética.



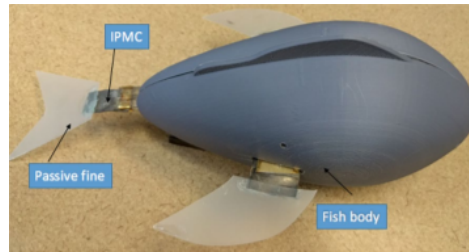
**Figura 2.7:** Vórtices formados en el nado del Robotuna (Triantafyllou y Triantafyllou, 1995).

### 2.2.3 Situación actual

En la actualidad se sigue investigando con métodos y materiales diferentes intentando conseguir un sistema óptimo. A continuación se nombraran algunos ejemplos.

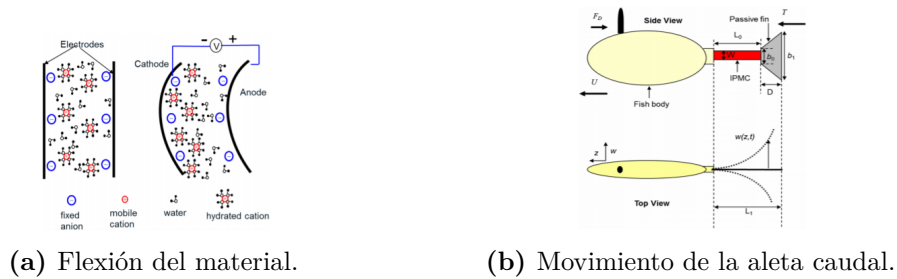
#### 2.2.3.1 IPMC Robotic Fish

Un pez robótico propulsado por una aleta caudal IPMC fue desarrollado en la *Universidad del Estado de Michigan* y explicado en Chen (2017). Inspirado por aletas de pez biológicas donde las membranas pasivas de colágeno son controladas por los músculos conectados a las espinas. Para ello aletas rígidas de plástico son unidas a la punta de IPMC para mejorar la propulsión.



**Figura 2.8:** IPMC Robotic Fish (Chen, 2017).

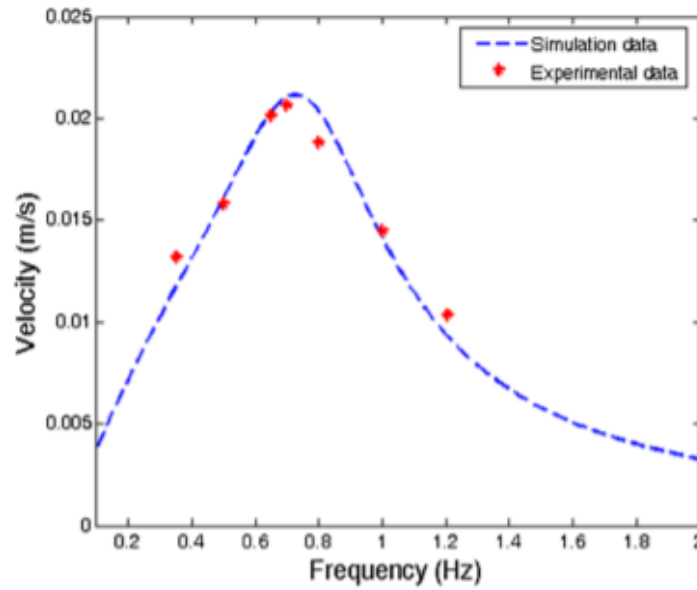
Un IPMC tiene una estructura de sándwich que consiste en una membrana de intercambio iónico con dos electrodos de metales nobles (oro o platino). La aplicación de un pequeño voltaje sobre el IPMC crea un campo eléctrico que conduce los iones positivos al lado del cátodo mientras que los iones negativos se quedan fijos en el polímero. Este desbalance produce una flexión en el material.



**Figura 2.9:** Explicación del movimiento de la aleta caudal (Chen, 2017).

La velocidad del modelo ha sido probada a través de experimentos. Cuatro tipos de aleta caudal con diferentes tamaños han sido utilizadas en el robot para verificar la escalabilidad geométrica de la velocidad. Una serie de señales cuadradas en una frecuencia específica (de 0.2 a 2 Hz) fueron aplicadas en la cola para la propulsión. La figura 2.10 muestra como se ha comportado frente a una serie de datos demostrando que puede ser bien capturado por un modelo de predicción. También se puede ver la frecuencia óptima en el pico.

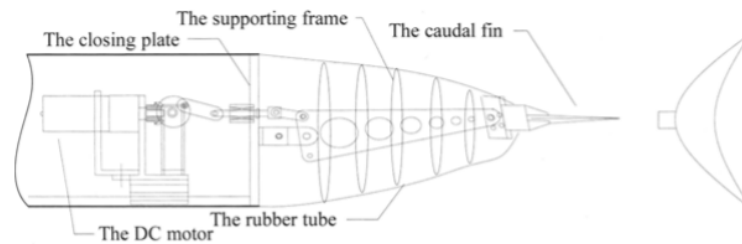




**Figura 2.10:** Gráfica de velocidad frente a frecuencia de aleteo (Chen, 2017).

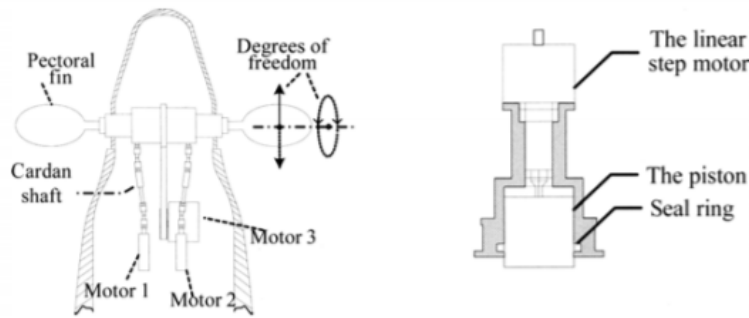
### 2.2.3.2 FAC-I

Como se explica en Zhou y cols. (2008), se observó directamente de los delfines que el movimiento de su aleta caudal es arriba y abajo. Con el fin de dotar al FAC-I con estas características, se diseñó el mecanismo de la aleta como se muestra en la figura 2.11. La cola se mueve gracias a un motor Direct Current (DC) y al mecanismo de una articulación. Aunque se distorsiona cuando se mueve, el tubo de goma mantiene la aerodinámica gracias a los marcos de soporte.



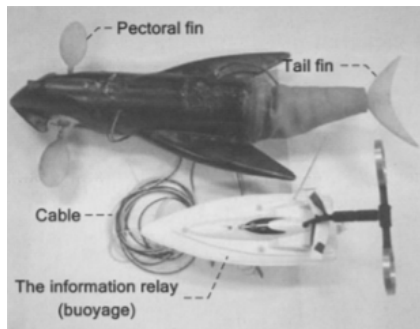
**Figura 2.11:** Aleta caudal del robot FAC-I (Zhou y cols., 2008).

El equilibrio es principalmente controlado por aletas pectorales y también son capaces de controlar la postura. El movimiento puede ser simplificado a dos tipos: rotación y aleteo. Con el fin de simplificar la estructura mecánica y el control, la rotación de las dos aletas pectorales puede ser uniforme, por lo tanto al haber 3 Degrees Of Freedom (DOF), tiene 3 motores paso a paso. El motor 1 y 3 rotan hacia adelante y hacia atrás en un rango concreto para hacer que las aletas aleteen de forma continua. Cuando el motor 2 rota, el ángulo de ataque de las aletas cambia. Todo esto satisface la maniobrabilidad del movimiento.

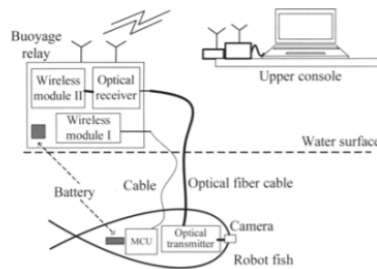


**Figura 2.12:** Aleta pectoral del robot FAC-I (Zhou y cols., 2008).

Para la comunicación con el robot, se le ha instalado un cable de fibra óptica para la información recibida de la cámara y un cable normal para la señal digital. Estos dos se comunican con una boya que se encuentra en la superficie del agua. Esta boya es pequeña y ligera para que el robot la pueda arrastrar. Desde la boya se transmite la información de manera inalámbrica a la consola.



**(a)** Robot FAC-I.

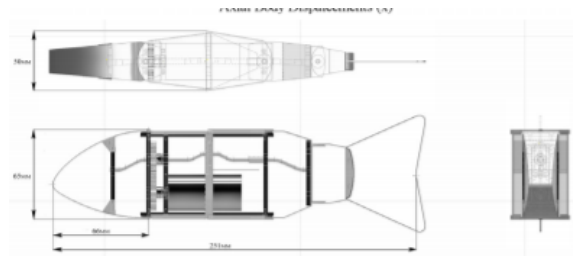


**(b)** Conexiones del FAC-I.

**Figura 2.13:** Conexiones y funcionamiento del robot y la boya (Zhou y cols., 2008).

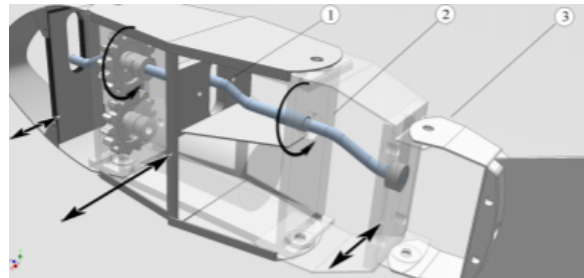
### 2.2.3.3 iSplash-I

Como se especifica en Clapham y Hu (2014), el pez robótico iSplash-I consta de 3 articulaciones activas que mueven la parte delantera y las dos primeras secciones de la parte posterior, y 1 pasiva que mueve la última sección de la cola.



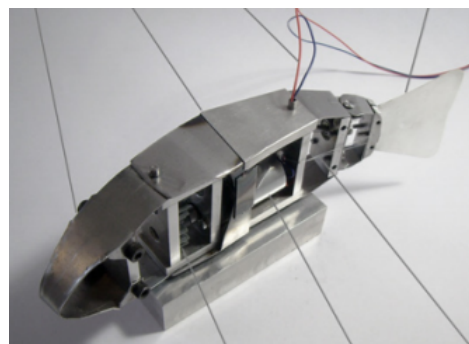
**Figura 2.14:** Aleta pectoral del robot FAC-I (Zhou y cols., 2008).

El sistema de transmisión que se puede ver en la imagen 2.15 pasando potencia rotativa a oscilaciones reales. Todas las articulaciones actuadas son directamente movidas por un cigüeñal de 5 cojinetes. Este diseño mecánico requiere de mucha precisión para evitar estancamiento y reducir la fricción.



**Figura 2.15:** Aleta pectoral del robot FAC-I (Zhou y cols., 2008).

Este pez robótico fue diseñado como una aproximación morfológica de la carpa común. Se ideó un prototipo robusto estructuralmente permitiendo consistencia con movimientos de alta frecuencia. El perfil hidrostático simplificado fue optimizando el grosor del pez en un 0.2 de la longitud total del robot reduciendo así el arrastre de presión.



**Figura 2.16:** Aleta pectoral del robot FAC-I (Zhou y cols., 2008).



## 3 Objetivos

Para alcanzar el objetivo principal, se han planteado los siguientes hitos:

- Recopilar información de los modelos actuales y sus características.
- Seleccionar los componentes óptimos para la construcción de un modelo.
- Modelado 3D del sistema.
- Calcular patrones de movimiento.
- Realizar simulaciones para comprobar el correcto funcionamiento.
- Construir y programar al robot.
- Realizar pruebas en seco y mojado.



## 4 Metodología

A lo largo de este apartado se explicaran los diferentes programas y cálculos que se han necesitado para desarrollar el proyecto.

### 4.1 Inventor

Autodesk Inventor es un software de modelado de sólidos 3D. Este programa fue utilizado en la asignatura de *Expresión Gráfica* y que ha servido para el diseño de la carcasa del pez.

Las herramientas más utilizadas son:

- **Solevación.** Sirve para unir dos bocetos indicando los raíles de conexión (si se quiere). Esto proporciona continuidad y suavidad a la unión creando piezas con formas inusuales.

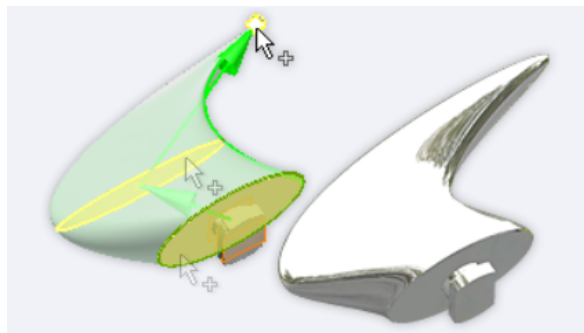


Figura 4.1: Solevación.

- **Extrusión.** Sirve para crear figuras prismáticas o agujeros a partir de un boceto. Cuando la geometría es genérica se llega a utilizar mucho.

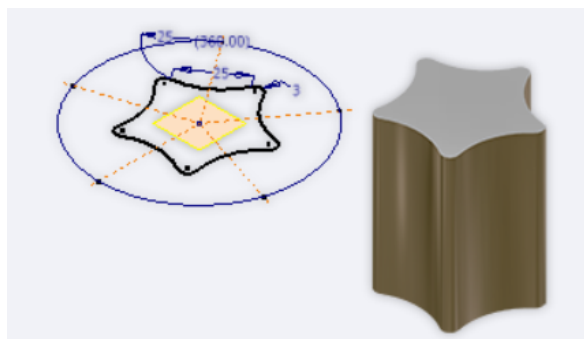
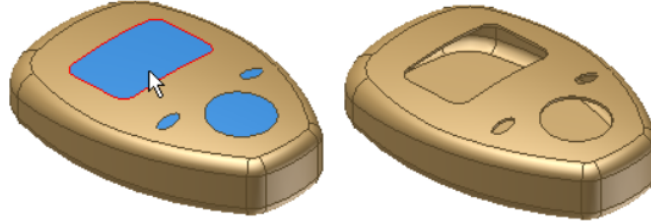


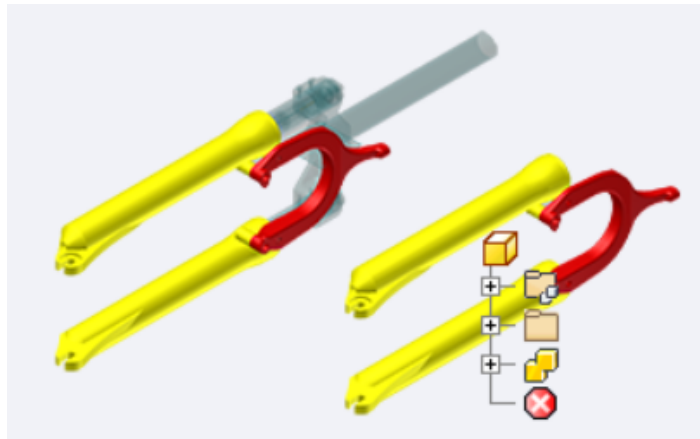
Figura 4.2: Extrusión.

- **Vaciado.** Sirve para generar huecos dentro de un sólido. Cuando la geometría se sale de lo convencional, es una herramienta muy útil.



**Figura 4.3:** Vaciado.

- **Derivar.** Sirve para hacer una copia de una pieza ya creada. Es necesaria cuando se requiere que otros sólidos sean compatibles con esta, por ejemplo, un agujero de tornillo común.



**Figura 4.4:** Derivar.

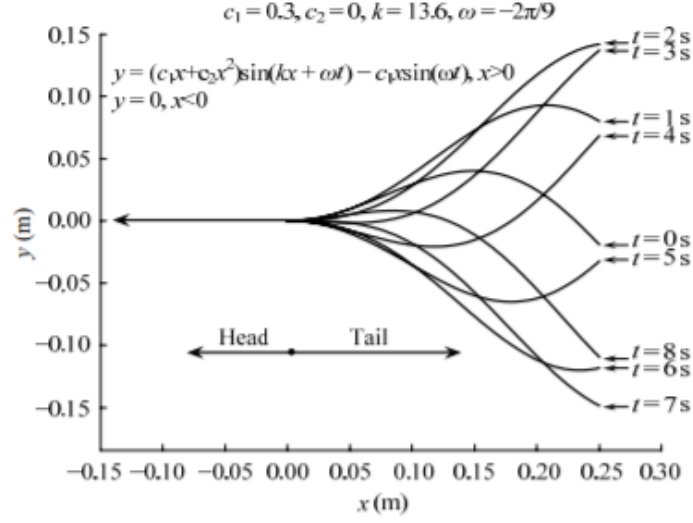
Una vez finalizado el diseño de la pieza, se puede guardar en formato STL. Este formato es leído por las impresoras 3D para la creación de objetos.

## 4.2 Movimiento carangiforme

Como es descrito en el artículo Liu y Hu (2010), el movimiento de los carangiformes puede ser aproximado y calculado. El movimiento recto de estos peces está definido por una ecuación que describe una onda que atraviesa la parte posterior de su cuerpo al nadar.

$$f_T(x, t) = (c_1x + c_2x^2)\sin(kx + wt) - c_1x\sin(wt) \quad (4.1)$$





**Figura 4.5:** Evolución de la onda en diferentes instantes de tiempo (Liu y Hu, 2010).

Esta ecuación puede ser discretizada para llegar a una aproximación digital. En vez de hacerla continua en el tiempo, es más fácil si se generan  $N$  intervalos que definen el movimiento en un ciclo. Con esto la ecuación quedaría así:

$$h_T(x, i) = (c_1 x + c_2 x^2) \sin\left(kx - \frac{2\pi}{M} i\right) - c_1 x \sin\left(-\frac{2\pi}{M} i\right), i \in [0, M - 1] \quad (4.2)$$

Las variables de la ecuación anterior son:  $c_1$ , una constante para la amplitud lineal de la onda;  $c_2$ , una constante para la amplitud cuadrática de la onda;  $k$ , el número de onda;  $M$ , el número de divisiones en el movimiento; e  $i$ , número de división actual.

A continuación, se realiza un sistema de ecuaciones entre la anterior y una recta que representa a un eslabón de la cadena para averiguar el punto de cruce entre ambas. Con esto se consigue que la cadena de eslabones se apegue lo máximo posible a la curva.

$$\begin{cases} y = h_T(x, i) \\ (x - Base\_x_{i,j})^2 + (y - Base\_y_{i,j})^2 = (R_c * l_j) \end{cases}, i = 0 \dots (M - 1), j = 1 \dots K \quad (4.3)$$

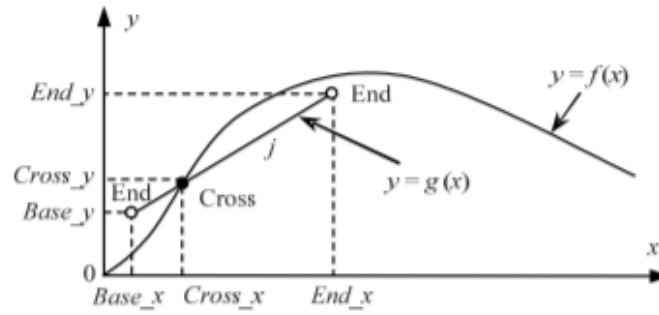
$$R_c = \frac{Cross\_x_{i,j}}{Base\_x_{i,j}}, R_c \in [0, 1] \quad (4.4)$$

Aquí se han introducido dos datos más. El primero es  $R_c$ , una proporción de la longitud del eslabón por donde cruzará la curva. Es una variable que será proporcionada para hacer el cálculo. Por otro lado está  $K$ , el número de eslabones de la cadena ya que es un cálculo que involucra todas las partes de esta.

Una vez resuelto el sistema, simplemente queda hacer trigonometría básica para obtener donde se encuentra el final del eslabón.

$$End\_x_{i,j} = Base\_x_{i,j} + l_j \cos\left(\frac{Cross\_y_{i,j} - Base\_y_{i,j}}{Cross\_x_{i,j} - Base\_x_{i,j}}\right), i = 0 \dots (M-1), j = 1 \dots K \quad (4.5)$$

$$End\_y_{i,j} = Base\_y_{i,j} + l_j \sin\left(\frac{Cross\_y_{i,j} - Base\_y_{i,j}}{Cross\_x_{i,j} - Base\_x_{i,j}}\right), i = 0 \dots (M-1), j = 1 \dots K \quad (4.6)$$



**Figura 4.6:** Gráfica del cruce entre el eslabón y la onda (Liu y Hu, 2010).

Después de esto, se calcula el error mediante la superficie que existe entre el eslabón y la curva de movimiento. Para ello:

$$e_{i,j}(x) = \left| \int_{Base\_x_{i,j}}^{End\_x_{i,j}} [g_{i,j}(x) - h_T(x, i)] dx \right|, i = 0 \dots (M-1), j = 1 \dots K \quad (4.7)$$

$$g_{i,j}(x) = k_{i,j}x - b_{i,j} \quad (4.8)$$

$$k_{i,j} = \frac{End\_y_{i,j} - Base\_y_{i,j}}{End\_x_{i,j} - Base\_x_{i,j}} \quad (4.9)$$

$$b_{i,j} = Base\_y_{i,j} - k_{i,j}Base\_x_{i,j} \quad (4.10)$$

Por último, se establece el punto final del eslabón actual por el punto base del siguiente y se repiten los cálculos hasta haber finalizado la cadena.

### 4.3 Matlab

Matlab es un programa de cómputo que permite realizar cálculos, representar datos, implementar algoritmos, etc. A lo largo de la carrera se ha utilizado en diferentes asignaturas, proporcionando así los conceptos básicos.

Dicho programa se ha usado para realizar todos los cálculos de la sección anterior y para realizar gráficas con los resultados obtenidos. Es una herramienta útil para cálculos tediosos y repetitivos que puede realizar mucho más rápido que un ser humano.

Se ha hecho uso de dos funciones para hacer el cálculo más sencillo. La primera es *vpasolve*, que es capaz de resolver numéricamente un sistema de ecuaciones. Esta función provoca que el tiempo de ejecución se alargue, pero es útil para evitar equivocarse despejando de ecuaciones complicadas. La otra es *int*, que permite calcular una integral sin tener que desarrollarla.

## 4.4 ROS

Robot Operating System (ROS) es un conjunto de librerías software y herramientas para el desarrollo de aplicaciones robóticas. En este caso se ha usado para simular el movimiento del pez y comprobar que todo sea correcto.

### 4.4.1 URDF

Los Unified Robot Description Format (URDF) son unos archivos eXtensible Markup Language (XML) que sirven para simular robots en el entorno de ROS.

Se pueden crear diseños de la nada mediante figuras geométricas sencillas o añadir complejas cargando un archivo STL. Estas piezas pueden estar dotadas de propiedades dinámicas para que el modelo se asemeje a la realidad lo máximo posible.

### 4.4.2 Gazebo

La simulación de sistemas robóticos es una herramienta esencial. Gazebo ofrece la posibilidad de simular de manera eficiente y precisa robots en entornos cerrados y abiertos. Se caracteriza por un motor de físicas robusto, gráficos de alta calidad y convenientes interfaces programáticas y gráficas.

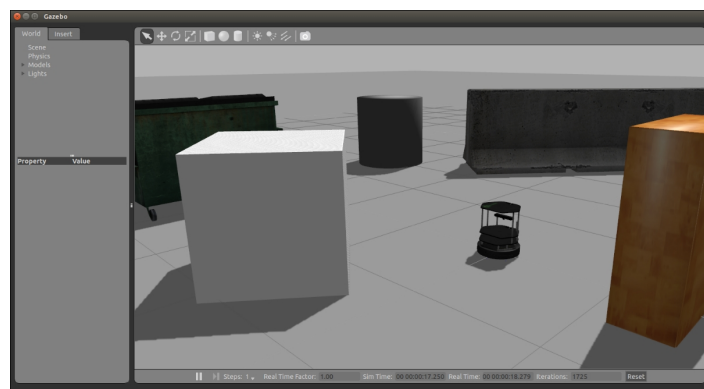


Figura 4.7: Imagen de una simulación en Gazebo.

### 4.4.3 MoveIt

MoveIt es un software de código abierto para ROS que es el estado de la técnica de software para la manipulación móvil.

Comenzar con MoveIt es muy sencillo, ya que el paquete incluye un asistente donde el usuario sólo proporciona el fichero URDF y define algunos aspectos (como la cadena cinemática deseada para el control). Todo el resto de información sobre la cadena, restricciones, masas y direcciones del eje se definen a su vez de forma automática por la información proporcionada en dicho archivo. Al final, este genera los archivos necesarios para el funcionamiento.

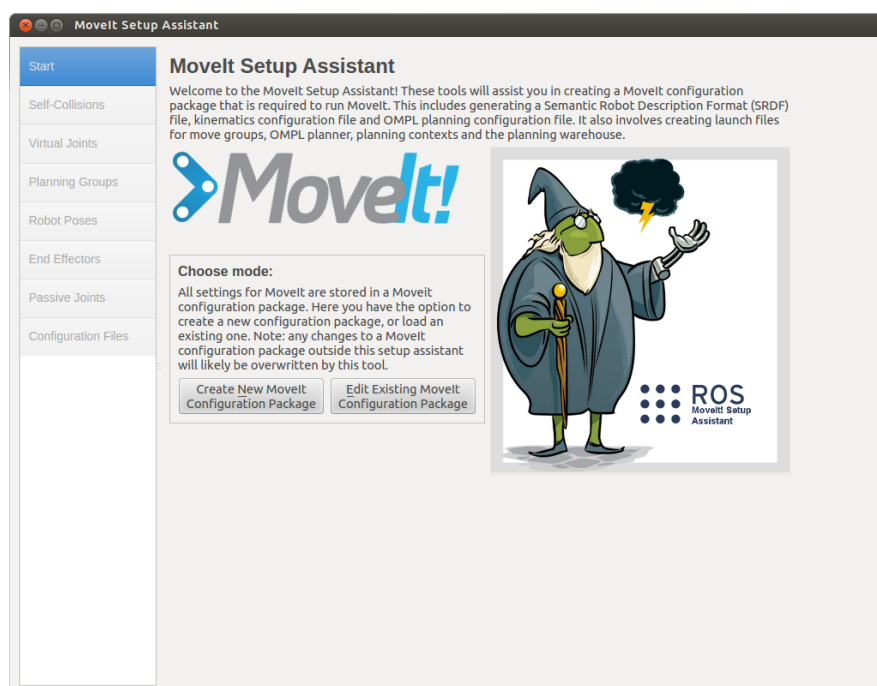


Figura 4.8: Asistente de MoveIt.

Este nodo permite llevar a cabo tareas de planificación de trayectorias complejas, percepción 3D, cálculos cinemáticos, control de colisión, control y navegación de forma sencilla.

## 4.5 Ultimaker Cura

Ultimaker Cura es un software de impresión 3D gratuito y fácil de usar. Se caracteriza por tres pantallas. La primera es *Prepare*, sirve para cargar un archivo, por ejemplo STL, y orientarlo y posicionarlos en la cama de impresión. En la pantalla de *Preview* se configuran los parámetros referentes a la impresión como velocidades, tipos de relleno, tipos de andamios, etc... También se ve una pequeña simulación de cómo se va a imprimir la pieza a nivel de capas. Por último, la pantalla de *Monitor* permite hacer un seguimiento en tiempo real cuando se está imprimiendo la pieza.

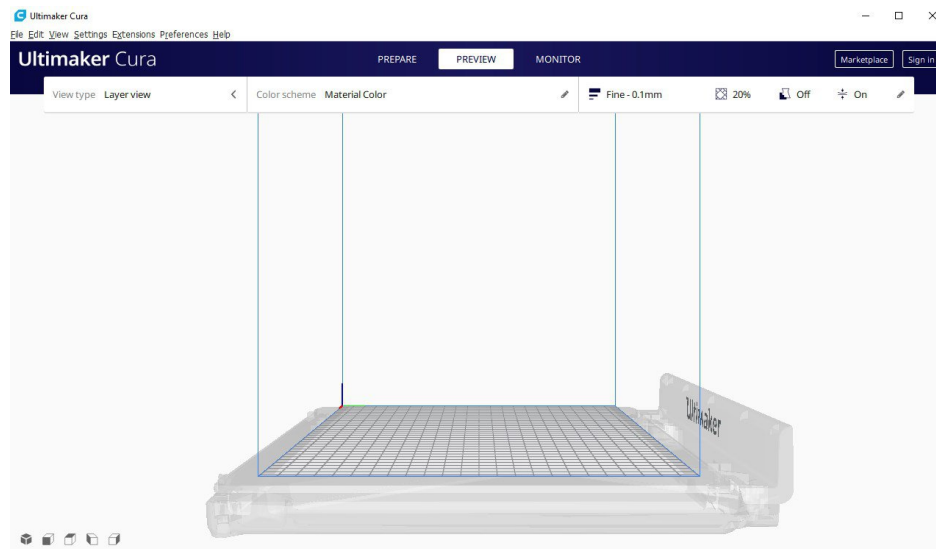


Figura 4.9: Interfaz de Ultimaker Cura.

## 4.6 Arduino

El software de código abierto de Arduino hace fácil programar código y subirlo a la placa. Este software puede ser usado con cualquier placa Arduino y las compatibles con estas.

Lo que más caracteriza a este software en cuanto a programación es que existen 2 bloques: el setup y el loop. En el primero se suele usar para configurar pines e inicializar variables. En el segundo se escribe el código de control que será repetido una y otra vez.

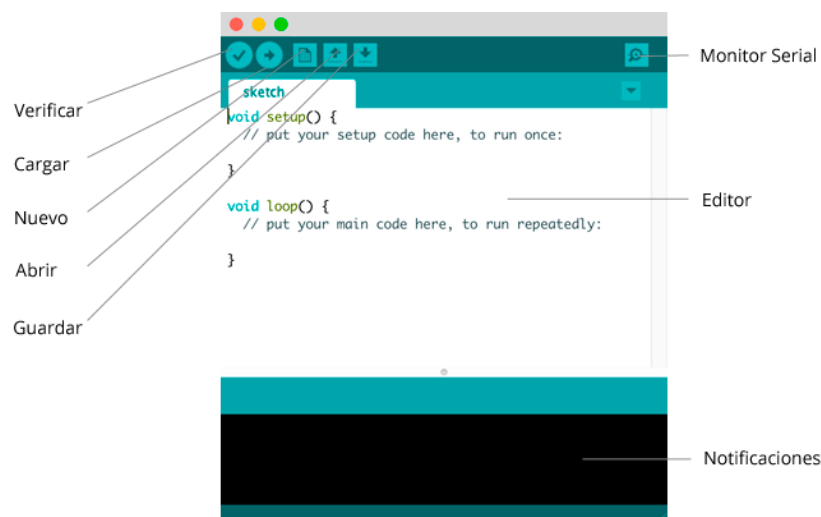


Figura 4.10: Interfaz Arduino.

## 4.7 Android Studio

Android Studio es el Integrated Development Environment (IDE) oficial para el desarrollo de apps para Android y está basado en *IntelliJ IDEA*. Además del potente editor de códigos y las herramientas para desarrolladores de *IntelliJ*, Android Studio ofrece incluso más funciones que aumentan tu productividad cuando desarrollas apps. En primer lugar, existe una pantalla de diseño visual en el que colocas bloques como botones, cuadros de texto, etc... Por otro lado, se programa qué pasará con dichos bloques y cómo interactúan entre sí en JAVA.

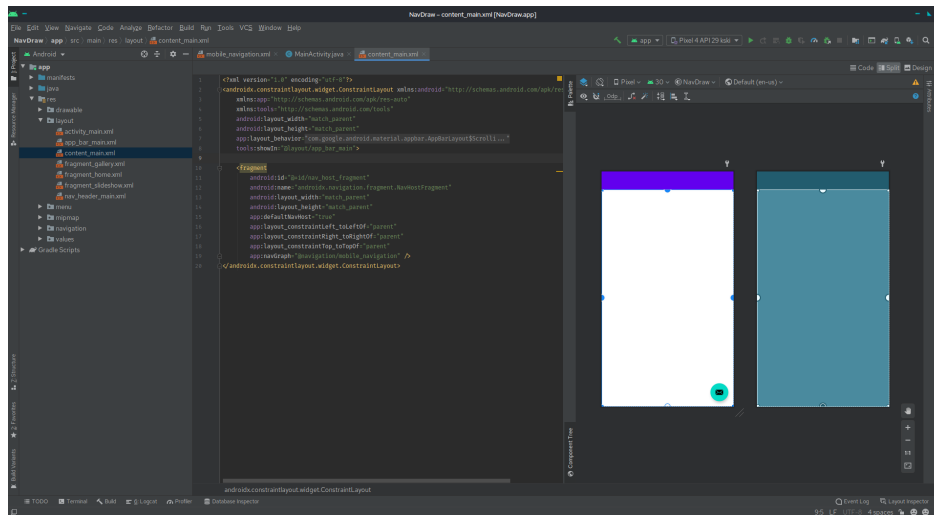


Figura 4.11: Interfaz Android Studio.

## 5 Desarrollo

### 5.1 Elección de componentes

En este apartado se recopilan algunos de los componentes que se tuvieron en cuenta a la hora de la elección. Se tuvo en cuenta diferentes aspectos para la selección de los mismos.

#### 5.1.1 Materiales

Al contemplar los diferentes materiales de los que estaría hecha la carcasa del robot, se tenía que tener en cuenta que no se deterioraran con el agua y que fueran lo suficientemente ligeros como para hacer que el robot flote.

Entre ellos se tuvo en cuenta el acero inoxidable y el plástico. El primero haría una estructura resistente pero el ensamblaje y fabricación serían un trabajo muy tedioso y que requiere de mucha precisión. En cambio el plástico es una elección muy buena porque es un material más barato y que, con la ayuda de una impresora 3D, es muy fácil diseñar piezas complejas de manera sencilla.

#### 5.1.2 Microcontrolador

El microcontrolador es el cerebro del robot y por eso es necesario elegirlo cuidadosamente. En este caso la balanza se decantó por un microcontrolador Arduino ya que se había visto durante la carrera. Lo más importante es que tuviera 3 puertos digitales para la generación de señales Pulse-Width Modulation (PWM) para el movimiento de los motores y una conexión sencilla de cables y baterías.

Entre los candidatos están los siguientes, pertenecientes a la marca ELEGOO que son más baratos que los Arduino originales.

En primer lugar está la placa ELEGOO MEGA:

- **Microcontrolador:** ATmega2560
- **Voltaje de funcionamiento:** 5V
- **Voltaje de entrada:** 7-9V
- **Pines digitales:** 54 (15 con PWM)
- **Pines analógicos:** 16
- **Memoria flash:** 256 KB (8 KB utilizados por el gestor de arranque)

- **SRAM:** 8 KB
- **Tamaño:** 101.5 x 53.3 mm
- **Peso:** 34 g
- **Precio:** 11.19 €

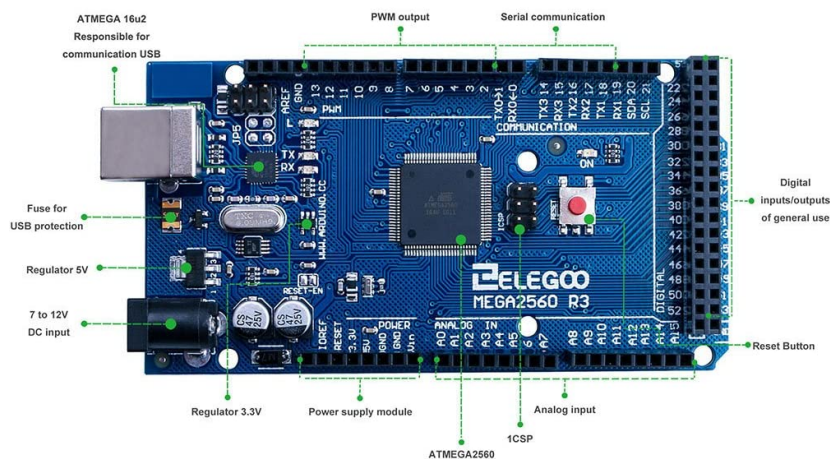


Figura 5.1: Placa ELEGOO MEGA.

La principal problemática es su tamaño, que es bastante grande. Por lo demás, cumple con las especificaciones. Por este motivo se buscó una alternativa.

Por otro lado está la placa ELGOO UNO:

- **Microcontrolador:** ATmega2560
- **Voltaje de funcionamiento:** 5V
- **Voltaje de entrada:** 7-9V
- **Pines digitales:** 14 (6 con PWM)
- **Pines analógicos:** 8
- **Memoria flash:** 32 KB (0.5 KB utilizados por el gestor de arranque)
- **SRAM:** 2 KB
- **Tamaño:** 80 x 59.9 mm
- **Peso:** 27.22 g
- **Precio:** 9.99 €

El tamaño de esta es algo más pequeño y aunque el número de pines es menor, será suficiente para la tarea a realizar.



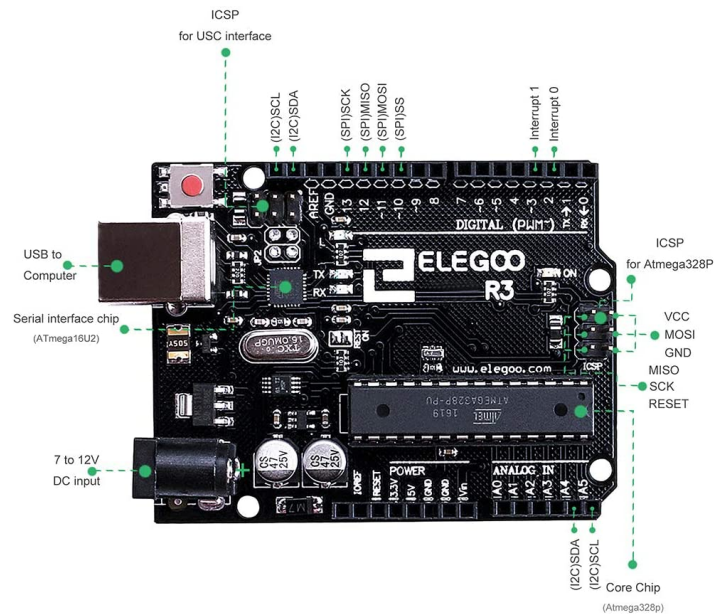


Figura 5.2: Placa ELEGOO UNO.

### 5.1.3 Cables

En el caso de los cables, sería más cómodo usar cables dupont para una fácil conexión con la placa y los diferentes componentes. También es necesario que tengan una longitud considerable para que pasen de los eslabones a la pieza central.

Con estas características se escogieron los cables dupont de la marca ELEGOO donde van 40 cables de cada tipo: macho-macho, macho-hembra y hembra-hembra de 20 centímetros.



Figura 5.3: Cables dupont hembra-hembra, macho-hembra y macho-macho.

### 5.1.4 Motores

Como se necesitaba un movimiento preciso de los motores la opción más clara era el uso de servos. Además, en arduino hay una librería que te permite controlarlos solo mandando los ángulos que deben alcanzar.

Hay muchos motores que son prácticamente los mismos, lo único en lo que se diferencian es el ángulo máximo alcanzado.

Por este motivo se eligió uno con menor ángulo máximo ya que sería suficiente para el movimiento y porque su precio era menor.

- **Voltaje de funcionamiento:** 4.8V 6.0V
- **Dimensiones:** 23 mm \* 12.2 mm \* 29 mm (L \* W \* H)
- **Velocidad de funcionamiento (sin carga):**  $0.09 \pm 0.01$  seg /  $60^\circ$  (4.8V)  $0.08 \pm 0.01$  seg /  $60^\circ$  (6V)
- **Par de parada (en bloqueo):**  $2.0 \pm 0.20$ kg · cm (4.8V)  $2.2 \pm 0.20$ kg · cm (6V)
- **Ángulo límite:**  $200^\circ \pm 1^\circ$
- **Peso:**  $9 \pm 1$  g
- **Longitud del cable del conector:**  $250 \pm 5$  mm
- **Juego excesivo:**  $0.5^\circ$
- **Recorrido de funcionamiento:**  $120^\circ \pm 10^\circ$  (900 → 2100 seg)
- **Precio:** 2.20 €/u



**Figura 5.4:** Micro-servos ZHITING SG90 9G

### 5.1.5 Módulo bluetooth

Es necesario establecer una forma de comunicación a distancia. En este caso se ha optado por el bluetooth para la conexión con un móvil aunque solo funcionaría en superficie ya que no se trasmite bien bajo el agua. En este caso los módulos destacables son el HC-05 y el HC-06. Se ha elegido el segundo ya que está configurado como módulo esclavo para recibir la información del módulo del móvil.

- **Configurable:** mediante comandos AT
- **Bluetooth:** V2.0+EDR
- **Frecuencia de operación:** 2.4 GHz Banda ISM
- **Modulación:** GFSK (Gaussian Frequency Shift Keying)
- **Potencia de transmisión:**  $\leq 4\text{dBm}$ , Class 2
- **Sensibilidad:**  $\leq -84\text{dBm}$  @ 0.1
- **Distancia:** hasta 10 metros en condiciones óptimas
- **Voltaje de Operación:** 3.6 VDC a 6 VDC
- **Consumo Corriente:** 30 mA a 50mA
- **Antena:** Integrada en el PCB
- **Dimensiones:** 4.4 x 1.6 x 0.7 cm
- **Precio:** 8.98 €



**Figura 5.5:** DSD TECH HC-06

### 5.1.6 Batería

Para la elección de la batería primero hay que tener en cuenta el consumo del sistema. Este estará definido principalmente por los motores que tienen un consumo en funcionamiento de 400 mA más el del módulo Bluetooth.

$$I_{Total} = n \times I_{Motor} + I_{Bluet} = 3 \times 400 + 30 = 1230mA \quad (5.1)$$

Con esto se obtiene un consumo total de 1.23 A. Si se quiere una autonomía aproximada de una hora, será necesaria una batería de 1200 mAh.

En este caso se usará una pila alcalina de 9 V con la mitad de capacidad pero existen de litio con esa capacidad y la conexión con la placa sería la misma.



**Figura 5.6:** Pila alcalina de 9V

Para la conexión con la placa se hará uso de un cable macho DC Power Plug compatible con Arduino.



**Figura 5.7:** Cable macho DC Power Plug

### 5.1.7 Breadboard

Es necesaria una forma de unión de cables para agrupar los de tierra y potencia de los motores. En este caso se ha optado por una mini breadboard. Este tiene conexiones suficientes para el proyecto y para futuras ampliaciones.

- **Material de la placa:** plástico ABS
- **Material contactos internos:** acabado en bronce fosforado
- **Base de la Junta:** Cinta autoadhesiva
- **170 ranuras:** 2 columnas de 17 carriles con filas de 5 ranuras cada columna
- **Tipo de contacto:** Tiras de metal
- **Clips de extensión:** Sí (puede extenderse con otros tableros)
- **Dimensión:** 45 mm x 34.5 mm x 9.5 mm
- **Precio:** 1.17 €/u



**Figura 5.8:** ELEGOO mini breadboard

### 5.1.8 Tornillos

Los tornillos son necesarios para fijar unas piezas a otras. En este caso se ha decidido el uso de métrica pequeña. Otra característica es que deben acabar en punta para que aunque el agujero quede más pequeño de lo debido, se puedan atornillar.

---



**Figura 5.9:** MEIYYJ M1 PA Phillips

### 5.1.9 Lubricante

Habr  piezas que roten entre sí teniendo superficies colindantes. Así que para evitar la fricción entre ellas se ha optado por adquirir y aplicar lubricante. Uno que es muy útil para todo tipo de situaciones es la grasa de silicona.



**Figura 5.10:** Grasa de silicona

### 5.1.10 Elección final

En resumen, todos los  rtculos necesarios y adquiridos son:

Componente	Elección	Precio/Unidad	Número	Coste
Carcasa	Filamento PLA 1.75 mm	22.99	1	22.99
Microcontrolador	ELEGOO UNO R3	9.99	1	9.99
Cables conexiones	Dupont 20cm	0.06	24	1.44
Cable batería	Cable macho DC Power Plug	0.50	1	0.50
Batería	Pila alcalina 9 V	1.50	1	1.50
Motores	Micro-servos ZHITING SG90 9G	2.20	3	6.60
Módulo Bluetooth	DSD TECH HC-06	8.98	1	8.98
Breadboard	ELEGOO mini breadboard	1.17	1	1.17
Tornillos	MEIYJ M1 PA Phillips	0.01	34	0.34
Lubricante	Technicql Grasa de silicona	8.98	1	8.98

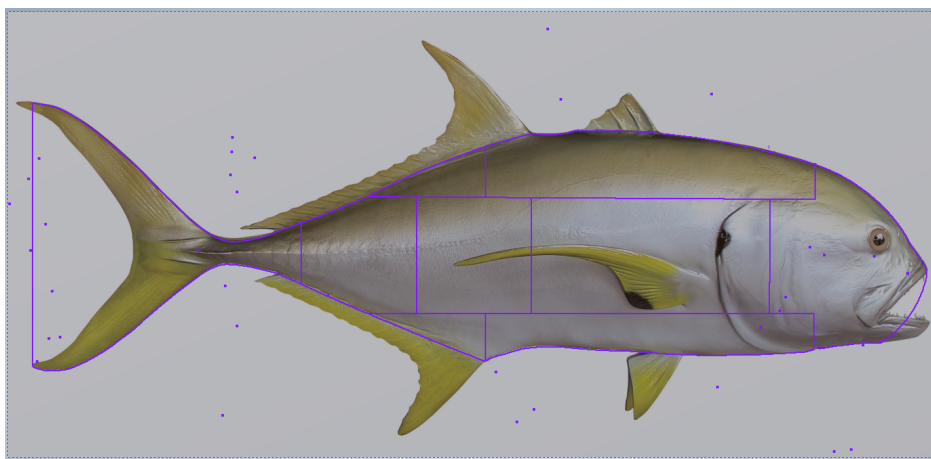
**Tabla 5.1:** Lista de costes.

Todo esto supone un total de 62.49€.

## 5.2 Diseño mecánico

Durante el siguiente apartado se explicará cómo se ha modelado el robot.

Lo primero que cabe destacar es que el diseño está basado en el pez jack caravelle perteneciente a los carangiformes. Una vez realizado un contorno aproximado, se dividió la imagen para el modelado de este en diferentes piezas.

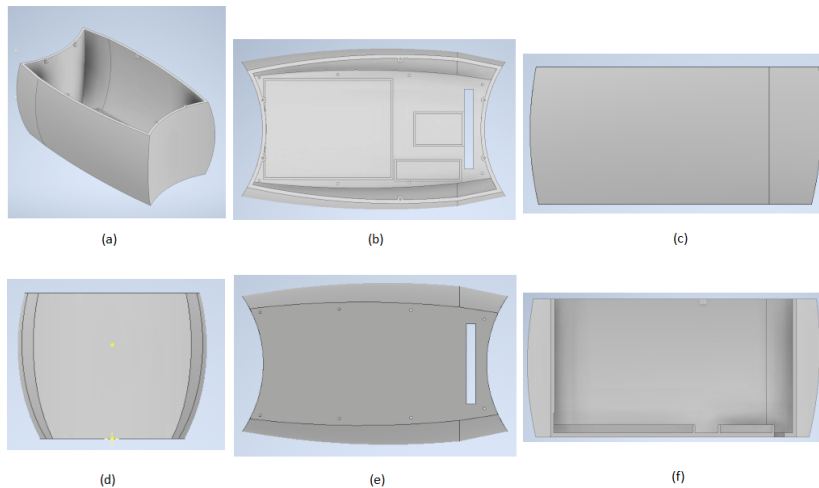


**Figura 5.11:** División del perfil del pez

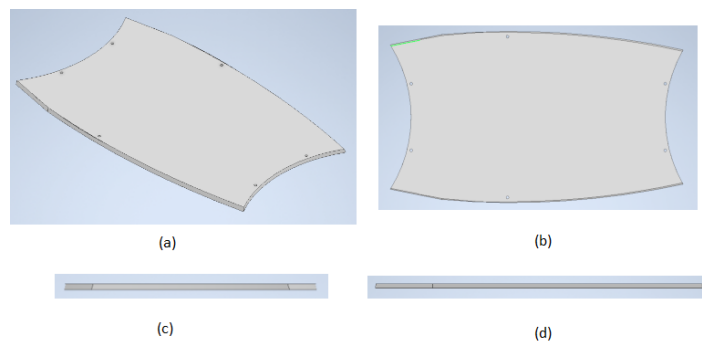
A partir de la imagen anterior, se han modelado las diferentes piezas por separado. Todas las piezas que son huecas con una apertura superior, tienen una tapa atornillable para mantener el interior seguro.

### 5.2.1 Centro

La parte central es donde se ubican la placa, la breadboard, la batería y el módulo Bluetooth. Como se puede ver en la imagen 5.12, dentro de la pieza y en la parte inferior hay una serie de rectángulos delimitados para evitar que estos componentes se muevan del sitio. También cabe destacar el agujero rectangular que sirve para pasar los cables que vienen por la pieza inferior.



**Figura 5.12:** Pieza central. (a) General, (b) Superior, (c) Frontal, (d) Derecha, (e) Inferior, (f) Frontal seccionado

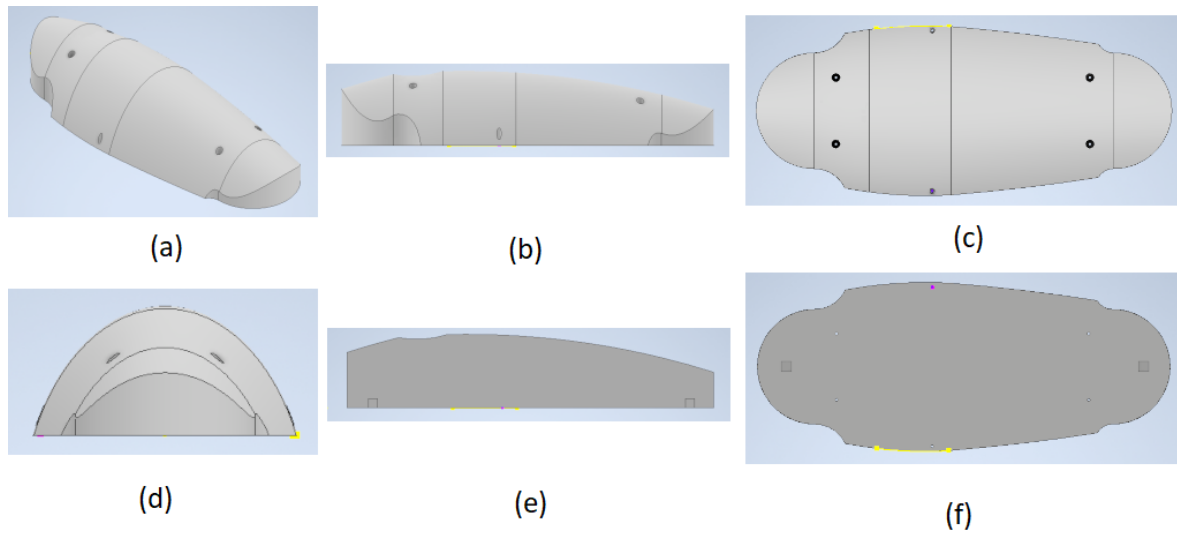


**Figura 5.13:** Tapa central. (a) General, (b) Superior, (c) Derecha, (d) Frontal

### 5.2.2 Parte superior

Esta pieza permite la rotación de la cabeza y del primer eslabón de la cola. Tiene dos huecos cuadrados donde se insertarán unas piezas que bloquean la rotación del eje motor y haciendo que sea el propio motor el que gire y, al estar atornillado a las piezas, que estas giren también.

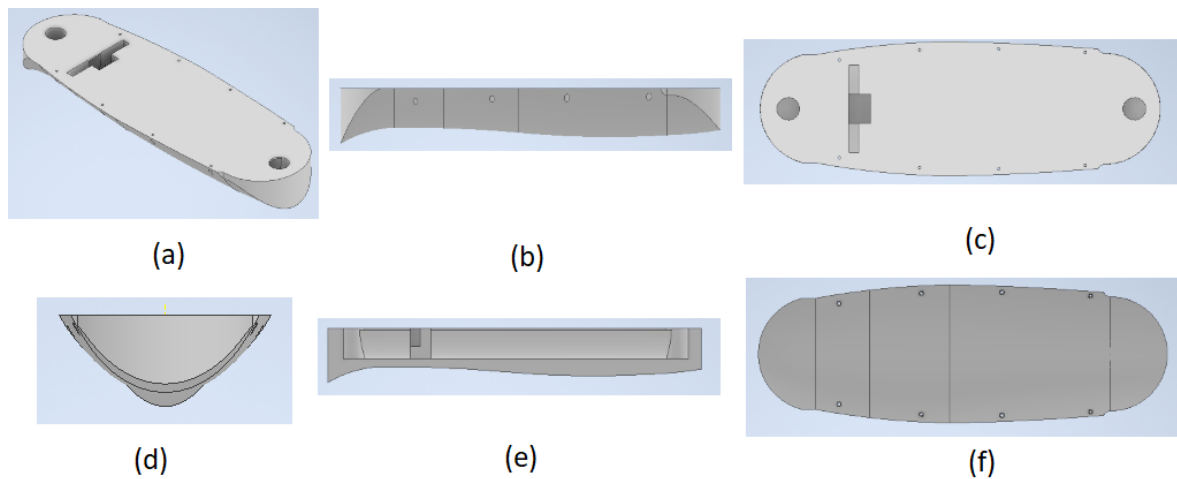




**Figura 5.14:** Pieza superior central. (a) General, (b) Frontal, (c) Superior, (d) Derecha, (e) Frontal seccionado, (f) Inferior

### 5.2.3 Parte inferior

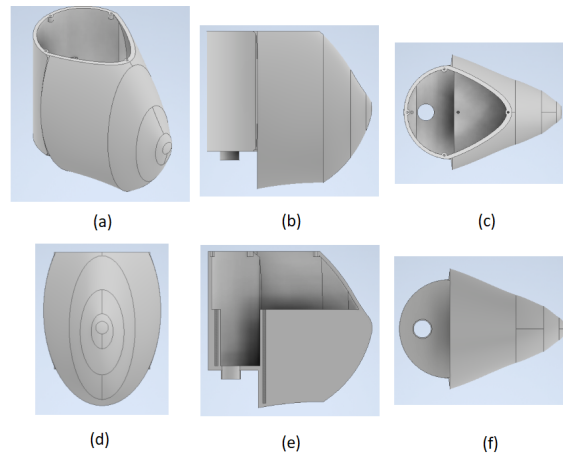
Por esta pieza pasan todos los cables de los motores y se dirigen a la pieza central. Por ese motivo tiene un túnel desde una punta a la otra con una abertura central. Esta abertura es más ancha por un lado para garantizar el poder sacar los cables ya que el otro lado es demasiado estrecho. A los lados de la pieza hay unos agujeros cilíndricos que permiten a las piezas apoyadas girar a la vez que pasar los cables.



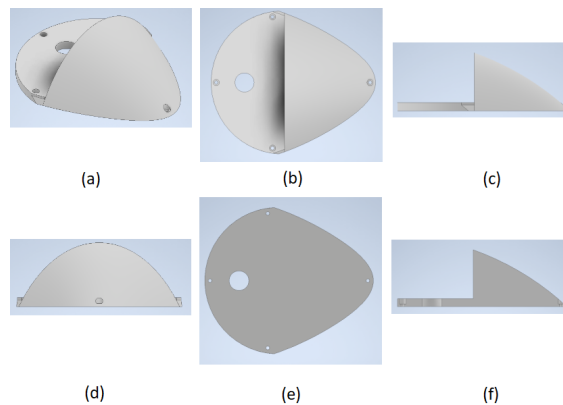
**Figura 5.15:** Pieza inferior central. (a) General, (b) Frontal, (c) Superior, (d) Derecha, (e) Frontal seccionado, (f) Inferior

### 5.2.4 Cabeza

En este caso, la pieza permite controlar la dirección de movimiento según a donde apunta. Dicha pieza contiene un motor, para ello se ha diseñado un hueco para poder atornillarlo y que quede fijo. En la parte inferior tiene un agujero cilíndrico que permite el paso de los cables y un cilindro hueco saliente como eje de giro inferior. En la tapa se puede ver otro agujero que sirve de paso para la pieza que va insertada en el eje motor y se conecta con la pieza superior.



**Figura 5.16:** Pieza cabeza. (a) General, (b) Frontal, (c) Superior, (d) Derecha, (e) Frontal seccionado, (f) Inferior



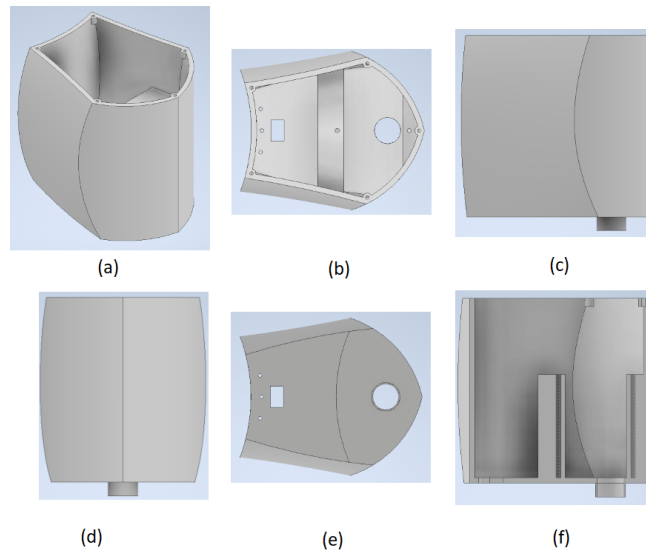
**Figura 5.17:** Tapa cabeza. (a) General, (b) Superior, (c) Frontal, (d) Derecha, (e) Inferior, (f) Frontal seccionado

### 5.2.5 Cola

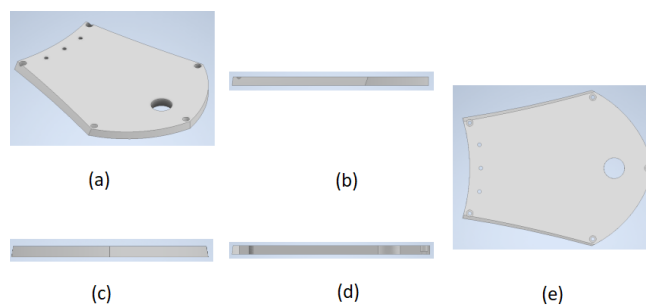
La cola la forman diferentes partes articuladas para generar movimiento. Esta consta de 2 articulaciones activas y una pasiva.

### 5.2.5.1 Eslabón 1

Es la primera parte de la cadena. El diseño es similar a la cabeza respecto al hueco para el motor y el paso de cables a la pieza inferior central. Una cosa a destacar es que tiene una abertura para que los cables del otro motor de la cola atraviesen esta pieza. También tiene unos agujeros para que una pieza superior e inferior puedan ser fijadas en ella y permitir la rotación independiente del siguiente eslabón.



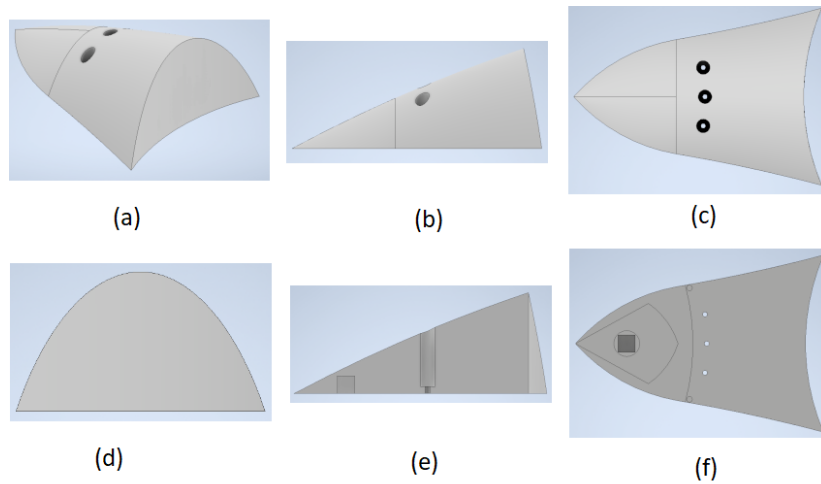
**Figura 5.18:** Pieza primer eslabón. (a) General, (b) Superior, (c) Frontal, (d) Derecha, (e) Inferior, (f) Frontal seccionado



**Figura 5.19:** Tapa primer eslabón. (a) General, (b) Frontal, (c) Derecha, (d) Frontal seccionado, (e) Superior

### 5.2.5.2 Parte superior

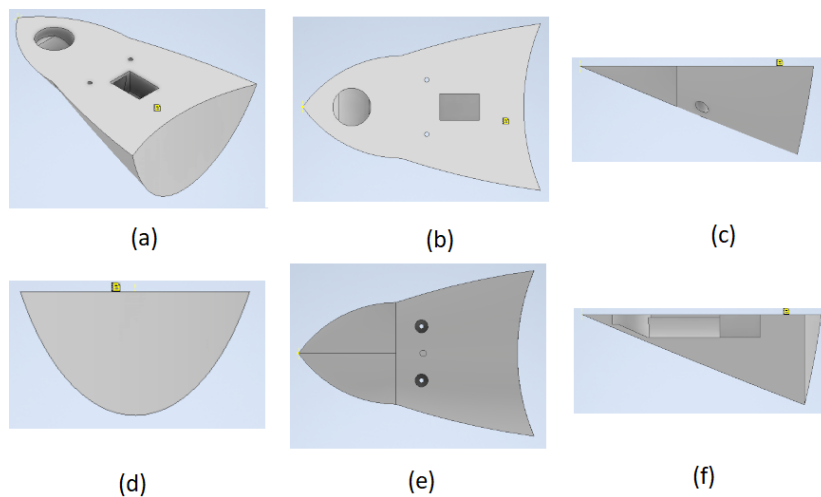
Esta pieza contiene un hueco para fijar la pieza del motor como en la pieza superior al centro.



**Figura 5.20:** Pieza superior de la cola. Pieza cabeza. (a) General, (b) Frontal, (c) Superior, (d) Derecha, (e) Frontal seccionado, (f) Inferior

### 5.2.5.3 Parte inferior

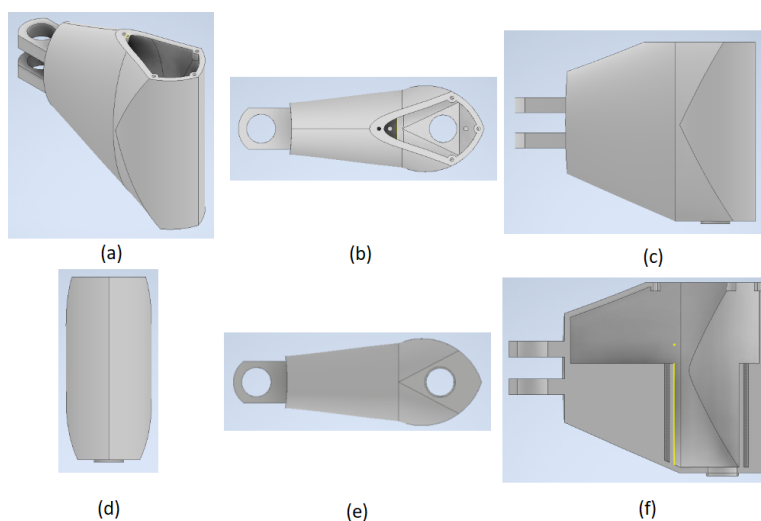
También contiene un pasadizo para el paso del cableado que funciona como el explicado anteriormente. Una cosa curiosa es que en el hueco cilíndrico del eje de giro, el fondo no es plano. Esto es debido a que un agujero de esa profundidad traspasa la pieza. En su lugar se diseñó un ligero chaflán para evitarlo.



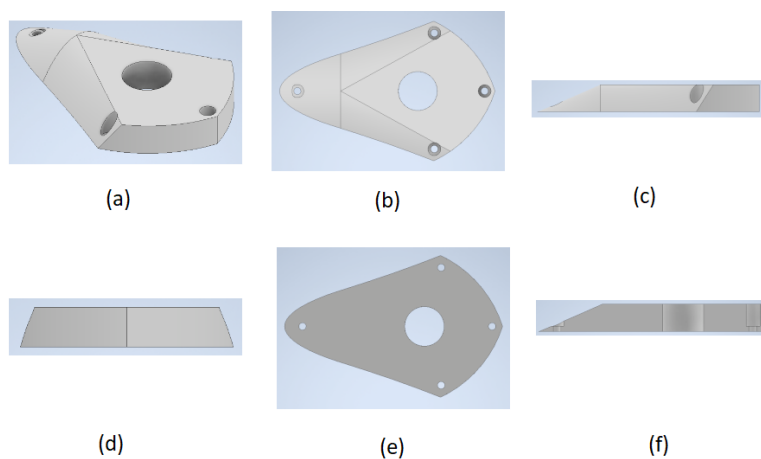
**Figura 5.21:** Pieza inferior de la cola. (a) General, (b) Superior, (c) Frontal, (d) Derecha, (e) Inferior, (f) Frontal seccionado

#### 5.2.5.4 Eslabón 2

La distribución interior y diseño inferior es similar a las otras piezas rotables. Cabe destacar que en la parte posterior hay dos anillos que permiten la conexión pasiva con el último eslabón.



**Figura 5.22:** Pieza segundo eslabón. (a) General, (b) Superior, (c) Frontal, (d) Derecha, (e) Inferior, (f) Frontal seccionado

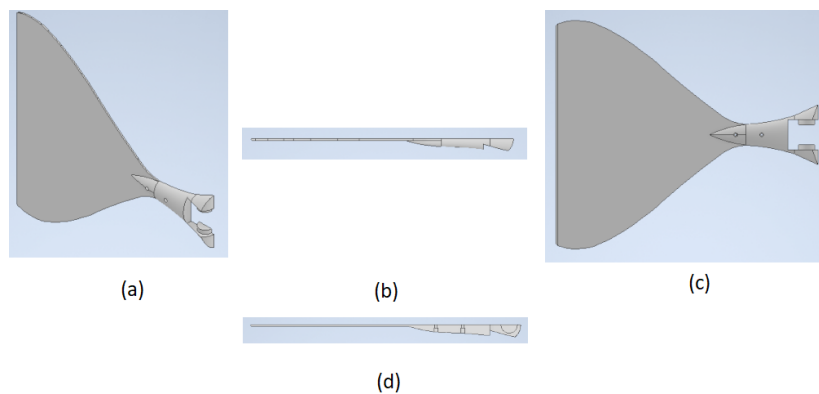


**Figura 5.23:** Tapa segundo eslabón. (a) General, (b) Superior, (c) Frontal, (d) Derecha, (e) Inferior, (f) Frontal seccionado

#### 5.2.5.5 Eslabón 3

Es la parte final de la cola. Esta contiene la aleta caudal, que es la más importante para el movimiento BCF. Está dividida en dos partes por la mitad pero se puede juntar de manera sencilla mediante dos tornillos. En la parte frontal hay dos salientes que permiten la conexión

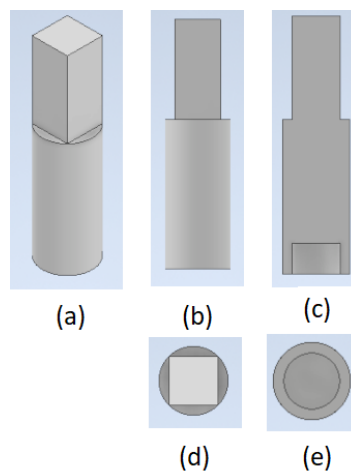
con los anillos del eslabón anterior. Hay que tener en cuenta que tiene una parte muy delgada para que sea un poco más flexible al momento de juntar las dos piezas. El problema es que existe riesgo de rotura frente a un gran impacto.



**Figura 5.24:** Una de las dos piezas cola. (a) General, (b) Superior, (c) Frontal, (d) Superior seccionado

### 5.2.6 Piezas para el motor


Hay un total de tres. Estas se sujetan a la parte giratoria del motor gracias a un agujero cilíndrico en la parte inferior. Respecto a la parte superior, se caracteriza por un prisma que será insertado en los huecos de las piezas superiores. La única diferencia entre ellas es que la parte central tiene diferentes longitudes según la distancia desde el motor a las piezas superiores.



**Figura 5.25:** Una de las tres piezas para los motores. (a) General, (b) Frontal, (c) Frontal seccionado, (d) Superior, (e) Inferior

## 5.3 Diseño electrónico

En el apartado actual se explicaran las conexiones a la placa de los diferentes componentes por separado para que quede claro. En el montaje real, todo se conectaría a la misma placa.

Lo primero es la conexión de los motores. Cada uno tiene tres cables: potencia, tierra y señal. Como la conexión requiere de tres motores y solo hay un pin de 5V y dos de tierra, se ha utilizado una placa protoboard para unir esas conexiones en una (positivo y negativo por separado). Estos dos cables que unifican los anteriores son conectados a la placa en sus respectivos pines. Cada uno de los cables de señal irá conectado a una clavija diferente con el símbolo , significa que la placa puede generar una señal PWM. En este caso, los pines elegidos son el 3, 5 y 6.

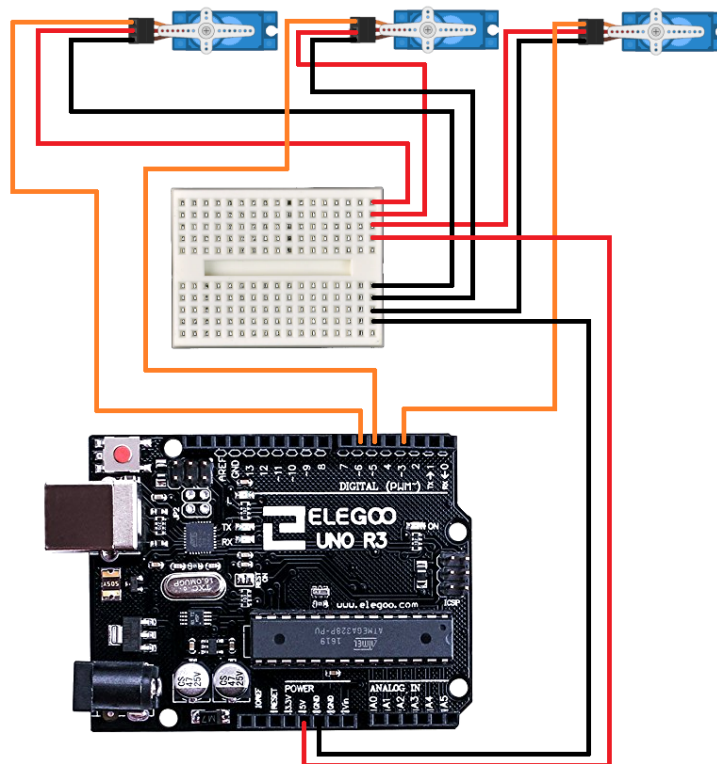
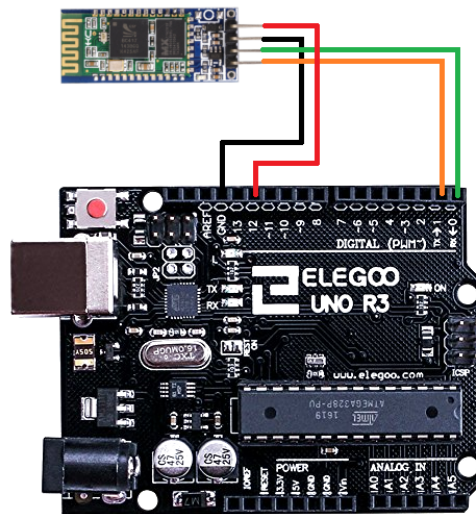


Figura 5.26: Esquema de conexiones de los motores

El módulo Bluetooth tiene cuatro posibles conexiones. La primera y la segunda son la potencia y la toma de tierra. Estas dos están conectadas en la parte digital. Esto es así porque si estuvieran conectados en la parte de abajo como los motores, el módulo se enchufaría al instante ocupando el puerto serie y a la hora de cargar un nuevo programa, el ordenador no podría porque dicho puerto está ocupado. Con esto se evita el tener que quitar y poner cables y, simplemente, habilitar ese pin desde el código. Por otro lado están las conexiones Tx y Rx. Estas conexiones son cruzadas, es decir, el pin transmisor de uno va al receptor del otro y viceversa.



**Figura 5.27:** Esquema de conexiones del módulo Bluetooth.

Por último, está la conexión de la batería. La pila se conecta a la parte ancha del cable mientras que el extremo largo se enchufa a la entrada de alimentación externa.



**Figura 5.28:** Esquema de conexiones de la batería.

## 5.4 Movimiento

### 5.4.1 Cálculo

En este apartado se explicará cómo se ha calculado el movimiento en forma de ola a partir de las ecuaciones vistas en la sección 4.2.



Para ello se han probado diferentes configuraciones desde un código en Matlab solo para la cola ya que el error generado por la cabeza será mucho menor debido a que la cola tiene más eslabones. Estas diferentes configuraciones son introducidas con un vector para cada variable con diferentes valores y probado con una serie de bucles. Esto hace que si los vectores son muy largos la espera se haga eterna.

En primer lugar se definen las constantes:

$C_2=0$ ; Para simplificar la complejidad de la ecuación

$K=3$ ; Número de eslabones de la cola

$M=18$  Número de divisiones en el movimiento

En segundo lugar se definen los vectores de las variables que se quieren probar diferentes valores. Algunos de estos intervalos se han obtenido al probar diferentes configuraciones y viendo cuál se parecía más a la curva.

$C_1 \in [0.05, 0.15]$  ; Probado hasta dar con un resultado aceptable

$k \in [15, 25]$  ; Lo mismo que el anterior

$R_c \in [0.2, 0.9]$  ; Se recuerda que es de 0 a 1

$l = [0.070922 \ 0.065653 \ 0.156662]$  ; Tamaño de cada eslabón en m

Después se pone en marcha hasta que el programa resuelve todas las ecuaciones. Una vez acabado, se comparan las configuraciones gracias a la suma de error durante un ciclo completo (18 movimientos). En este caso se van a guardar dos configuraciones: La que menor error resultante tiene y la del error más cercano a la media.

#### **Error mínimo**

$C_1 = 0.05$

$k = 25$

$R_c = 0.6789$

#### **Error medio**

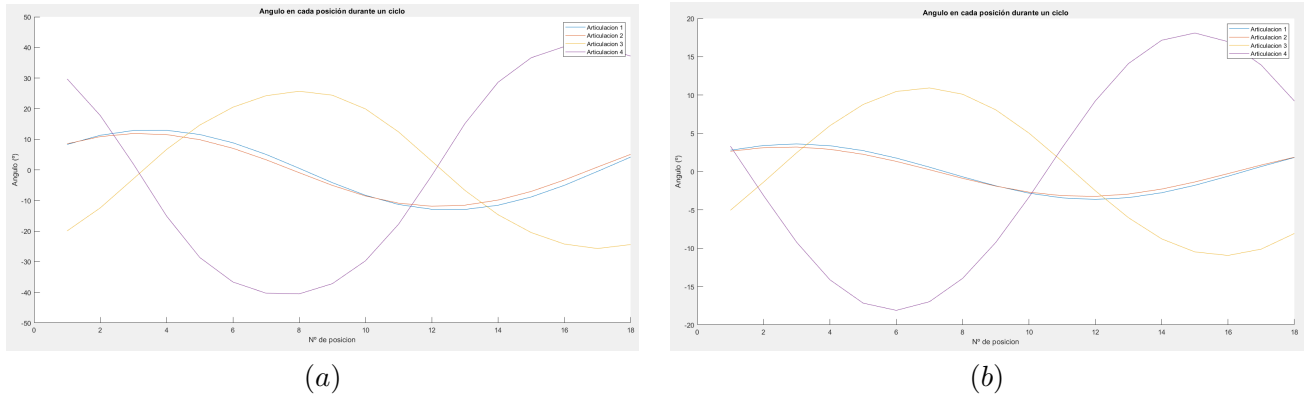
$C_1 = 0.15$

$k = 25$

$R_c = 0.9$

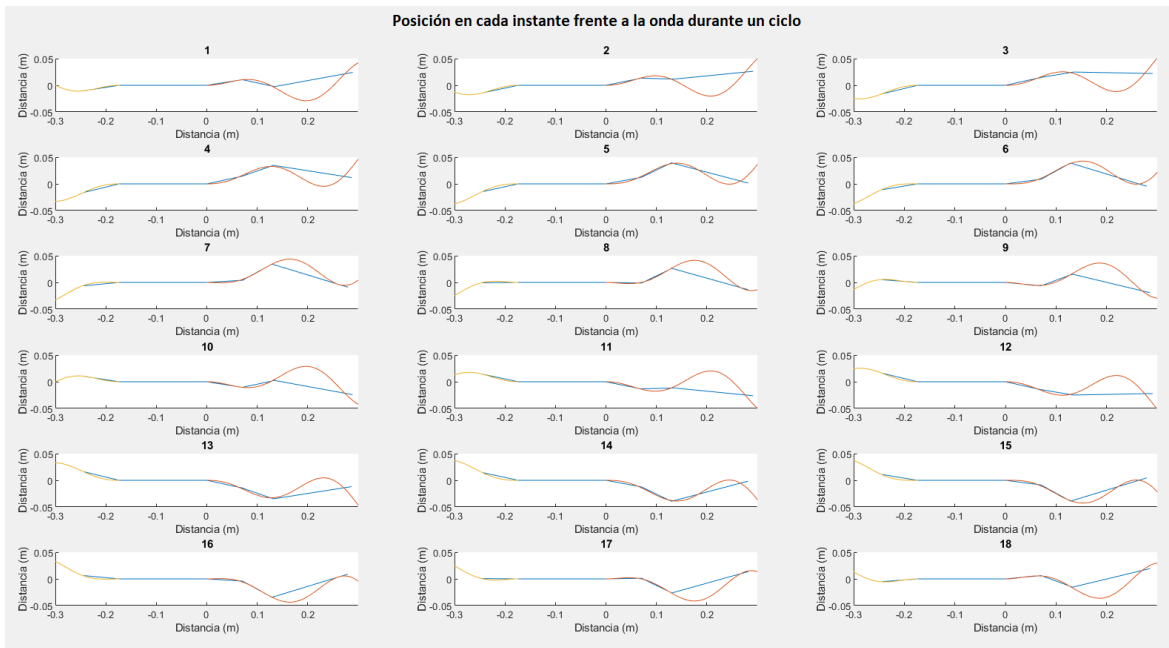
Ahora solo queda ver el resultado aplicando las ecuaciones de nuevo para el pez entero. Los resultados se verán con la muestra de tres gráficas: la evolución de los ángulos, el error en cada posición y la comparación entre la posición de los eslabones y la curva de seguimiento para todos los movimientos.

En primer lugar, la evolución de los ángulos en cada iteración es similar. La diferencia entre las dos es que la de error medio tiene ángulos más altos mientras que la otra los tiene más bajos.

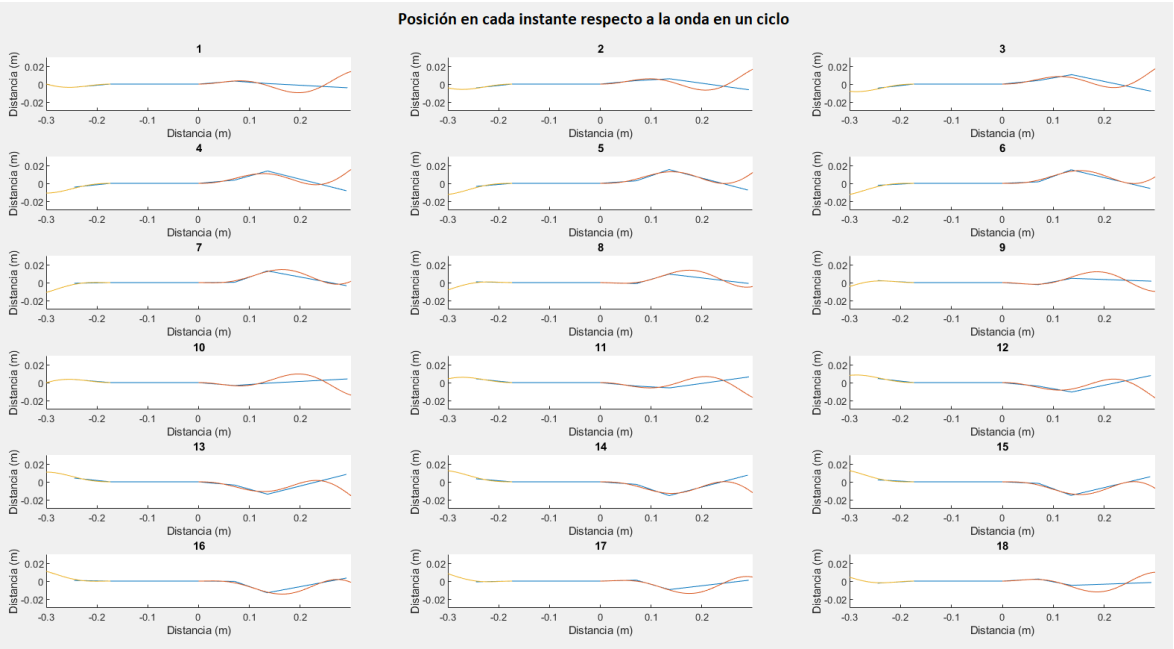


**Tabla 5.2:** Comparación entre la evolución de los ángulos durante un ciclo. (a) Error medio, (b) Error mínimo

En segundo lugar, se pueden ver todas las posiciones del robot. Se puede apreciar que los huecos entre el pez y la onda en todas estas es mayor en la de error medio. Esto significa que el error es mayor. También destacar que la amplitud de onda es mayor por eso los ángulos para alcanzarla son mayores.

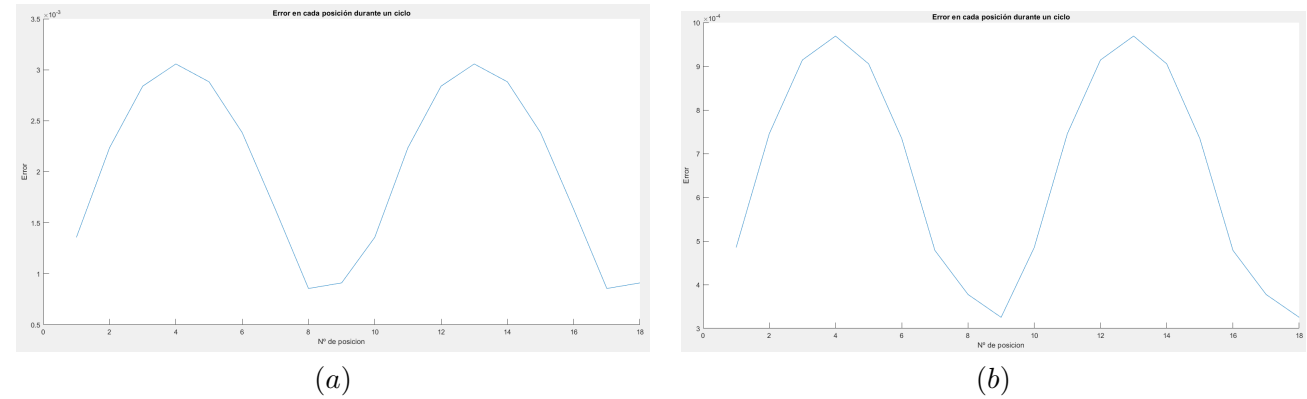


**Figura 5.29:** Comparación entre la posición en cada instante frente a la onda durante un ciclo del error medio.



**Figura 5.30:** Comparación entre la posición en cada instante frente a la onda durante un ciclo del error mínimo.

Por último, la evolución del error se puede ver una formación de dos picos y valles. Estos se corresponden a las posiciones más alejadas y más cercanas del origen de las ordenadas respectivamente.



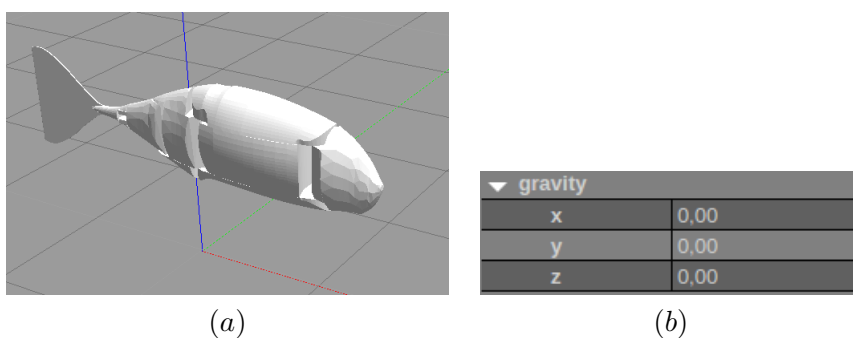
**Tabla 5.3:** Comparación entre la evolución del error en cada posición durante un ciclo. (a) Error medio, (b) Error mínimo

### 5.4.2 Comprobación

Para que el robot sea capaz de moverse, las piezas deben permitir los giros que sean necesarios. Gracias a *ROS*, *Gazebo* y *MoveIt* es posible comprobarlo.

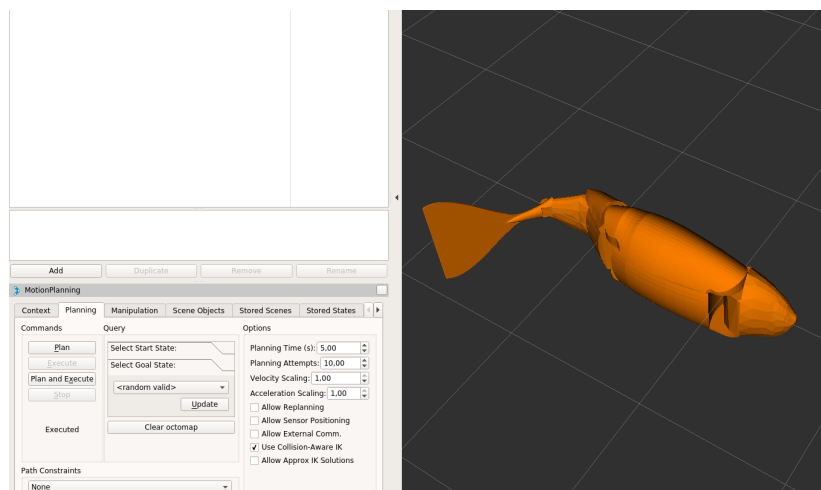
El primer paso es cargar los modelos de las piezas en formato STL desde unos ficheros URDF cuandolas entre sí como si fuera un montaje. Se crea una pieza y se une a la anterior con una articulación fija o móvil y así hasta que el robot está completo.

También se creó un mundo en gazebo sin gravedad. Esto es para que al generar el robot no caiga por su propio peso.



**Tabla 5.4:** Simulación en Gazebo. (a) Pez generado, (b) Vector de gravedad

El siguiente paso fue la configuración de los ficheros MoveIt con el archivo URDF anterior. Gracias al asistente de MoveIt solo hay que hacer una serie de especificaciones clave como posiciones predeterminadas o sistemas de referencia para que esté todo listo.



**Figura 5.31:** Pantalla de MoveIt al ejecutarlo.

Por último, se creó un código en Python para enviar las órdenes a MoveIt a través de unos comandos con los ángulos que debe tener el robot proporcionados por *Matlab*.

Una vez puesto en marcha todo el robot ejecuta todas las trayectorias de las dos configuraciones sin ningún problema. Esto significa que el robot puede moverse libremente sin choques dentro de estos intervalos.

```
[ INFO] [1624618317.318271918, 530.730000000]: Combined planning and execution request received for MoveGroup action. Forwarding to planning and execution pipeline.
[ INFO] [1624618317.318322039, 530.730000000]: Planning attempt 1 of at most 1
[ INFO] [1624618317.320045650, 530.730000000]: Planner configuration 'arm' will use planner 'geometric::RRT'. Additional configuration parameters will be set when the planner is constructed.
[ INFO] [1624618317.320546322, 530.730000000]: RRT: Starting planning with 1 states already in datastructure
[ INFO] [1624618317.463082023, 530.990000000]: RRT: Created 5 states
[ INFO] [1624618317.463204548, 530.990000000]: Solution found in 0.143081 seconds
[ INFO] [1624618317.463268920, 530.990000000]: SimpleSetup: Path simplification took 0.000002 seconds and changed from 2 to 2 states
[ INFO] [1624618317.866923182, 531.630000000]: Completed trajectory execution with status SUCCEEDED ...
```

Figura 5.32: Resultado obtenido para todos los movimientos de las dos configuraciones.

## 5.5 Construcción

A lo largo de este apartado se explicará como se han creado las piezas y se han ensablado para la formación final del robot.

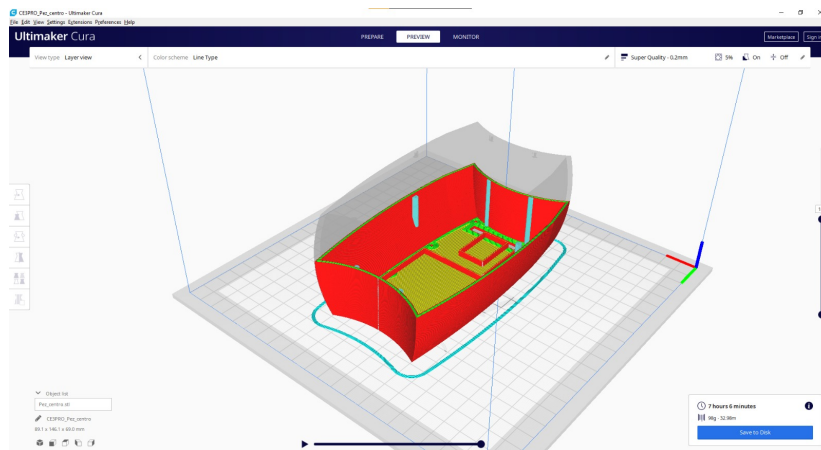
### 5.5.1 Impresión 3D

En primer lugar fue configurar la impresora y ajustarla. El modelo de la impresora es *Creality Ender 3 Pro*. Se le puso un extrusor de 0.4 milímetros y se ajustó la cama manualmente para dejarla lo más horizontal posible.



Figura 5.33: Impresora Creality Ender 3 Pro.

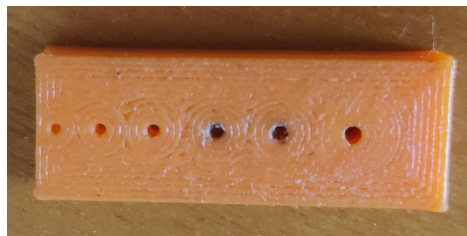
Para poder imprimir las piezas, previamente se deben cargar en el programa Ultimaker Cura y configurar algunos parámetros de la impresora y de la impresión.



**Figura 5.34:** Pieza central cargada en Ultimaker Cura.

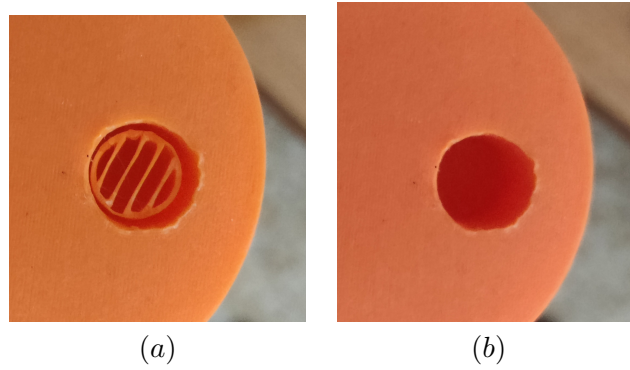
Después de esto, se empezó imprimiendo la pieza inferior a la central. Una vez acabada, se vieron algunos problemas en el diseño.

Los agujeros para los tornillos eran originalmente de métrica uno (iguales que los tornillos) pero debido a errores de precisión de la impresora, que tienen que ver con la configuración de la misma para que los tiempos de espera no sean excesivamente largos, se quedaron muy pequeños y los tornillos acababan rompiéndose o limándose antes que pasar por el agujero. Para arreglarlo, se tuvo que hacer una prueba. Se diseñó una pieza prismática con diferentes agujeros que iban desde métrica 1 a métrica 5. Una vez impresa, se observó que los agujeros de métrica cuatro eran los adecuados.

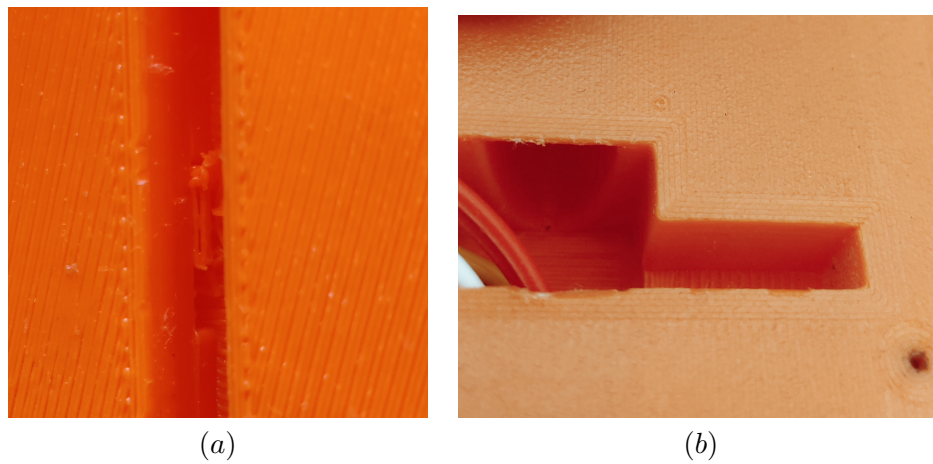


**Figura 5.35:** Pieza central cargada en Ultimaker Cura.

El otro error tenía que ver con los túneles. El diseño era rectangular y para imprimir el techo de este, se necesitaban apoyos. Estos andamios en agujeros corrientes son fáciles de retirar, pero los de dentro de la pieza no. Por ese motivo se cambió su diseño a uno parabólico. Con esto la impresión de una capa siempre tiene apoyo en la anterior y no son necesarios andamios.

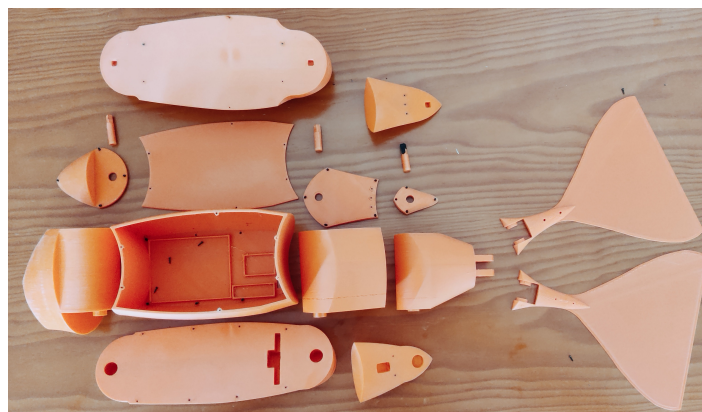


**Tabla 5.5:** Ejemplo de andamio. (a) Agujero con andamio, (b) Andamio retirado.



**Tabla 5.6:** Cambio del túnel. (a) Túnel cuadrado lleno de andamios, (b) Túnel parabólico.

Después de estos ajustes el resto de las piezas se imprimieron correctamente.



**Figura 5.36:** Todas las piezas impresas.

Pieza	Peso (g)	Longitud impresa (m)	Tiempo impresión (h)
Inferior centro	86	11.5	7:25
Inferior cola	18	2.456	2:21
Superior centro	126	16.484	8:26
Superior cola	15	1.952	1:39
Cabeza	76	10.136	7:33
Tapa cabeza	10	1.348	1:00
Centro	96	12.884	8:16
Tapa centro	21	2.84	1:38
Eslabón 3 cola A	16	2.112	1:31
Eslabón 3 cola B	16	2.112	1:31
Eslabón 1 cola	69	9.304	6:34
Tapa eslabón 1 cola	7	0.94	0:39
Eslabón 2 cola	38	5.156	4:54
Tapa eslabón 2 cola	2	0.268	0:15
Motor cabeza	1	0.152	0:24
Motor eslabón 1 cola	1	0.124	0:20
Motor eslabón 2 cola	1	0.136	0:22

**Tabla 5.7:** Información de todas la piezas impresas.

### 5.5.2 Montaje

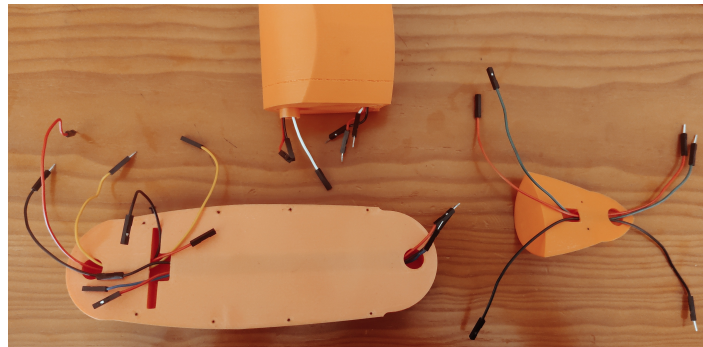
Para empezar se han cogido las piezas de la aleta caudal y se han atornillado entre sí para formar una única pieza. Acto seguido se ha calentado con un secador las partes más delgadas, para dotarlas de cierta flexibilidad, y se ha introducido en los dos anillos de la pieza colindante.



**Figura 5.37:** Unión del segundo y tercer eslabón de la cola.

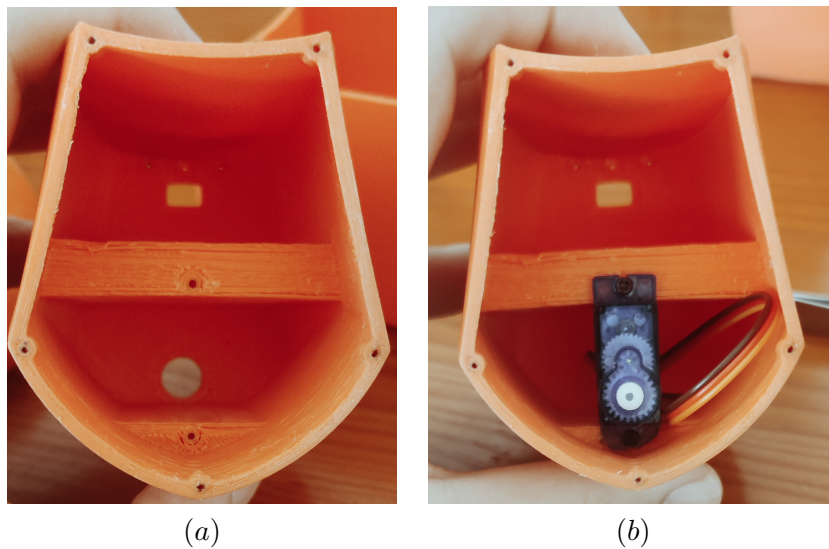
A continuación, se han pasado los cables por los túneles y por el interior del primer eslabón de la cola para facilitar el tema de conexiones.





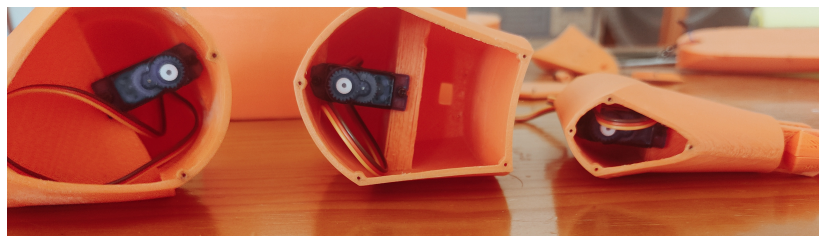
**Figura 5.38:** Cables pasados por todas las piezas necesarias.

Seguido a esto, se han colocado y atornillado los servomotores en los eslabones correspondientes. Algunas asas de los motores han tenido que ser limadas para que no chocaran contra la pared.

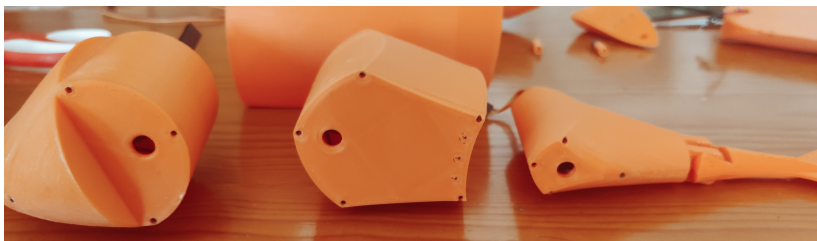


**Tabla 5.8:** Montaje de un motor. (a) Pieza sin motor, (b) Pieza con motor.

El siguiente paso ha sido atornillar las tapas a las piezas anteriores para cerrarlas completamente.



**Figura 5.39:** Piezas con motores sin las tapas colocadas.



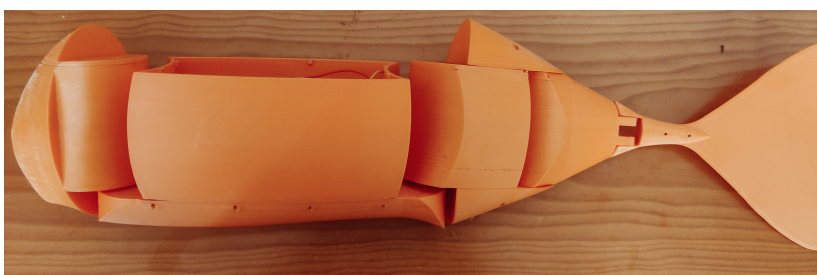
**Figura 5.40:** Piezas con motores con las tapas colocadas.

Después de esto, se han conectado los cables del primer eslabón de la cola y su pieza inferior. Acto seguido, se han atornillado para mantenerlas fijas. Una vez finalizado lo anterior, se han conectado estos cables al motor del segundo eslabón de la cola. También se ha introducido en el agujero por el que rotará, añadido la pieza del motor por el agujero de la tapa y montado la pieza superior a estas uniéndolas así la cola en su totalidad.



**Figura 5.41:** Todas las piezas de la cola unidas.

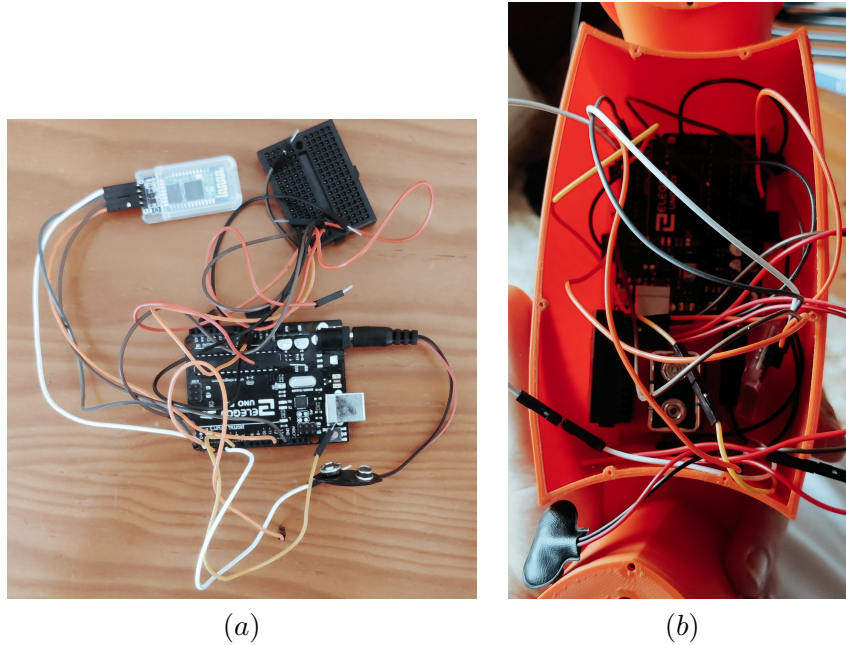
A continuación, se han pasado los cables que salen en el agujero de en medio de la pieza inferior central por el orificio de la pieza central. Además, se ha atornillado entre sí. Seguido a esto, se han conectado la cabeza y la cola al conjunto central.



**Figura 5.42:** Cabeza y cola unidas a la pieza central.

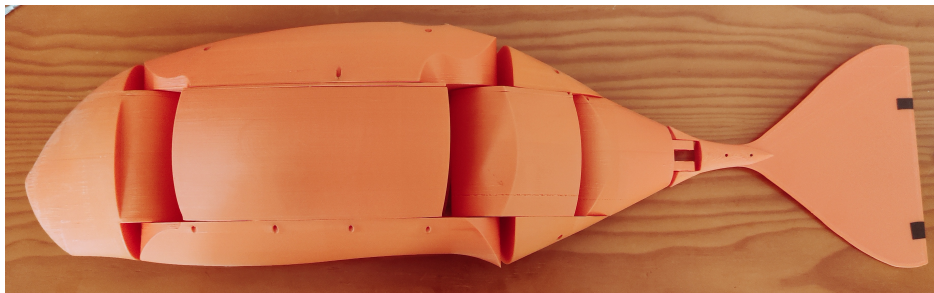
El siguiente paso ha sido seguir los esquemas de electrónicos para conectar el módulo Bluetooth, el cable de la pila y la placa protoboard al microcontrolador. Acto seguido, se han

introducido dentro de la pieza central y se han hecho las últimas conexiones entre los motores y la placa.



**Tabla 5.9:** Conexiones. (a) Fuera del robot, (b) Dentro del robot.

Por último, se han montado entre sí la tapa central y la pieza superior, se han insertado las dos piezas de motor faltantes y se ha cerrado el robot. También cabe destacar que todas las partes que puedan sufrir de fricción al rotar se les ha aplicado lubricante de silicona para que se muevan adecuadamente.



**Figura 5.43:** Pez completamente montado.

## 5.6 Control

En este apartado se explicará la programación relacionada con el robot y con la forma de manejo.

---

### 5.6.1 Código

La programación se ha hecho con Arduino ya que es compatible con la placa.

En primer lugar, se configuran los pines usados en la placa, se enchufa el el módulo Bluetooth y se colocan los motores en  $60^\circ$  ya que es la mitad del máximo permitido por el servo.

A continuación se empieza el bucle de control. Durante este, se irán recibiendo órdenes desde la aplicación móvil. Según esta orden, los motores se moverán de una forma u otra.

El movimiento está dividido en 4 modos. El primero consiste en el desplazamiento hacia adelante siguiendo la onda calculada en Matlab. El segundo consiste en un movimiento hacia adelante con giro. Esto se consigue rotando 25 grados la cabeza mientras que la cola se mueve con normalidad. El tercero es similar al anterior pero con el giro hacia la izquierda. Y, por último, el cuarto modo lleva los motores a la posición *home* (motores a  $60^\circ$ ) y detiene el movimiento reseteando la onda a la primera posición.

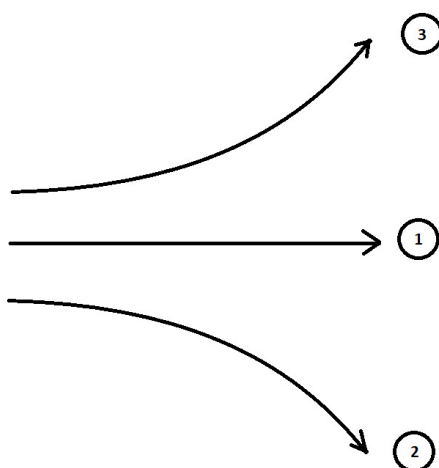
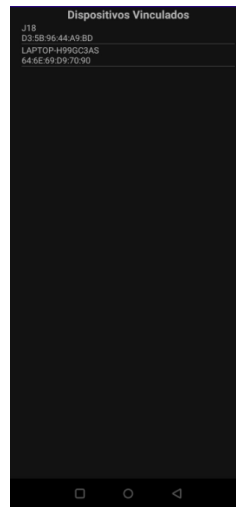


Figura 5.44: Ejemplo de desplazamiento según el modo.

### 5.6.2 Aplicación móvil

En cuanto al manejo del pez, se ha decidido usar una aplicación móvil. Para crearla se ha hecho uso de Android Studio. Esta aplicación permite el diseño estético con bloques y la programación de estos para que funcionen. También destacar que existen dos pantallas: la de conexión de dispositivos Bluetooth y la pantalla de manejo.

Respecto al diseño estético de la pantalla de dispositivos, es simplemente una lista que incluye los dispositivos que ya están registrados en móvil por lo que se tiene que conectar previamente desde los ajustes del teléfono.



**Figura 5.45:** Lista de dispositivos vinculados.

El diseño estético de la pantalla de manejo consiste en una serie de botones y un bloque de texto que notifica el movimiento que se está utilizando. Los botones son tres flechas que muestran hacia dónde se moverá el pez y una casa que significa la posición home y parada del robot. También hay otro botón abajo que sirve para desvincular el dispositivo.



**Figura 5.46:** Panel de control.

En cuanto a la programación, los botones centrales envían caracteres que son recogidos por la placa y traducidos en movimiento. Respecto al bloque de texto este muestra información de en qué modo está el pez. Esto es gracias a unos caracteres que envía la placa al móvil y nos ayuda a saber que están llegando las órdenes. Por otro lado, el botón de desconectar interrumpe la conexión y se desvincula del dispositivo. La lista que se muestra en la pantalla de dispositivos recoge todos aquellos que están registrados en el teléfono y los muestra uno debajo de otro. Para conectar con un dispositivo, simplemente se pincha el deseado en la

lista y automáticamente salta la pantalla de manejo. Cualquier otro dispositivo que no sea compatible con arduino dará un error de conexión. Si esto ocurre se vuelve a la pantalla de dispositivos para la reconexión.



## 6 Resultados

En este apartado se verán los frutos del trabajo realizado a lo largo del proyecto. Para ello se observará su comportamiento en diferentes aspectos.

### 6.1 Piel

Para dotar al pez de impermeabilidad se pensó que recubrirlo con una especie de piel sería lo más sencillo y no preocuparse de la entrada de agua a nivel de articulación. Respecto a esto se probaron dos modos.

El primer prototipo consistía en plástico de forro para libros. Después de limpiar el pegamento de dos láminas se usó un soldador para juntarlos y sellarlos térmicamente. Por último, se le introdujo agua dentro para comprobar su fiabilidad. Al poco de introducir agua se veían gotas caer. Se dejó una hora más y el agua introducida prácticamente había desaparecido. Esto es debido a la imprecisión de la técnica utilizada.



(a)



(b)

**Tabla 6.1:** Filtración de agua en la funda. (a) Goteo, (b) Menos agua.

Como alternativa se usó un preservativo cortado por la punta. Este se ajustaba bien a la forma gracias a la elasticidad del material. El problema es que al estar tan estirado y no estar pensado para esos diámetros acabó rompiéndose. Pero con ese material y algo más grueso se podría llegar a una buena solución.



**Figura 6.1:** Rotura de la piel.

## 6.2 Pruebas en mojado

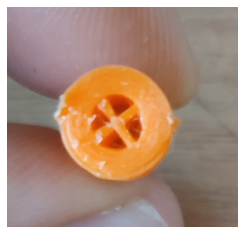
Como no se ha podido encontrar nada para cubrir de fugas de agua al robot la prueba en el agua es sin componentes electrónicos ya que de lo contrario se estropearían. Aun así, se sellaron con cinta aislante las partes de conexión entre piezas que eran fijas.

Lo primero que cabe destacar es que al dejarlo sobre la superficie del agua, no se mantenía en vertical.



**Figura 6.2:** Pez flotando en el agua.

Esto es debido a que aunque el pez está diseñado para pesar más por la parte inferior, las piezas impresas están rellenas con espacios que contienen aire ya que, de haberlas impreso completamente sólidas, el tiempo de impresión sería excesivamente largo.



**Figura 6.3:** Hueco generado en las piezas sólidas.

Se podría solucionar haciendo que uno de los lados pese mucho más que el otro añadiendo



piezas de plomo e ir ajustando la posición y peso hasta conseguir dejarlo de forma vertical.

A pesar de proteger las piezas con cinta aislante, el agua entró dentro del pez. Es debido a que las zonas de articulaciones están desprotegidas al no poder sellarse para que se pudieran mover libremente. Si se pone una piel como la comentada anteriormente, el filtrado de agua no sería un problema.



**Figura 6.4:** Goteo de agua tras filtrarse en el interior.

## 6.3 Pruebas en seco

A continuación, se hablará de la suavidad del movimiento y la resistencia del robot.

### 6.3.1 Movimiento

En cuanto al movimiento, se puede ver un movimiento fluido y se puede apreciar el efecto onda que producen los motores coordinados. Esto es gracias a añadir la grasa de silicona. Otra cosa a destacar es que después de unos días al aire, dicho lubricante se había secado un poco haciendo que las piezas se movieran con algunos tirones.

Con una distancia de aproximadamente 6 metros, el módulo bluetooth seguía recibiendo información procedente de la aplicación móvil sin ningún problema. Esta distancia podría ser mayor ya que la distancia teórica máxima es de 10 metros.

---



**Figura 6.5:** Instantánea en el movimiento del pez



**Figura 6.6:** Instantánea en el movimiento del pez

### 6.3.2 Golpes

Por accidente, algunas piezas cayeron al suelo desde una distancia de 70 centímetros y resultaron ilesas a la caída a excepción de una. Esta fué la parte final de la cola. Como ya se había mencionado antes, esta pieza tiene una parte muy delgada para darle flexibilidad al momento de ensamblarla. Tras el golpe, dicha pieza se fracturó por esa zona.



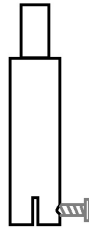
**Figura 6.7:** Aleta caudal rota por el impacto.

## 7 Conclusiones

La tarea de modelar y construir un robot es una tarea difícil ya que se tiene que tener en cuenta muchas variables. Aun así, el resultado es satisfactorio porque sirve de buena base de cara al futuro y a nuevas mejoras.

Los objetivos han sido cumplidos a excepción del movimiento en el agua debido a no encontrar una piel apropiada para la impermeabilidad del pez y la flotabilidad en horizontal de este. Sin embargo, el movimiento conseguido en el robot es fluido y exitoso.

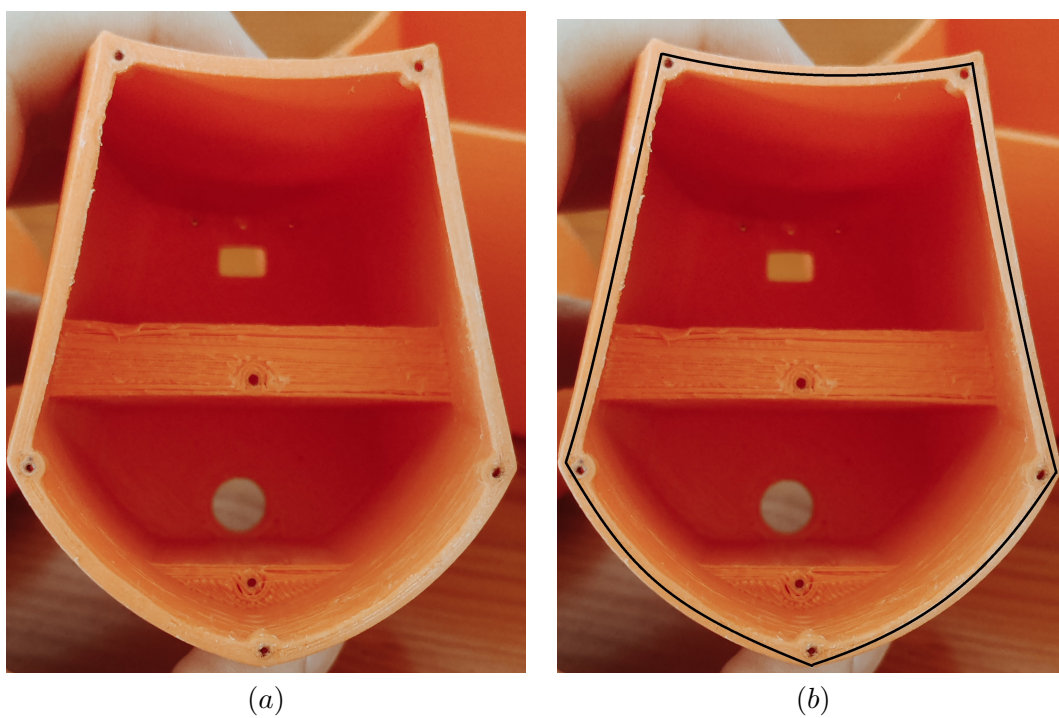
En cuanto a posibles mejoras, a parte de las ya mencionadas para la problemática actual, se podría mejorar la conexión entre las piezas para el motor y los motores haciendo una hendidura y un agujero para apretarlas con un tornillo contra el eje de giro para una mayor fijación. Actualmente se insertan mediante presión y, a pesar de que da buenos resultados, podría mejorarse.



**Figura 7.1:** Hueco generado en las piezas sólidas.

Otra posible mejora podría tener que ver con el movimiento en 3 ejes añadiendo una bomba de agua que regule la flotabilidad. Añadiendo inmersiones también se tiene que mejorar el control de este ya que el Bluetooth no funciona bajo el agua.

Para mejorar la impermeabilidad del diseño en todas las uniones que son fijas se puede hacer una hendidura y agregar una pequeña cinta de goma para sellar mejor las piezas. También se podrían añadir arandelas de goma a los tornillos y evitar el filtrado de agua desde los agujeros.



**Tabla 7.1:** Concepto para mejora de aislamiento. (a) Pieza sin goma aislante, (b) Pieza con goma aislante.

---

## Bibliografía

- Bowen, A. D., Yoerger, D. R., Taylor, C., McCabe, R., Howland, J., Gomez-Ibanez, D., ... Jakuba, M. V. (2008). The nereus hybrid underwater robotic vehicle for global ocean science operations to 11,000m depth. En *Oceans 2008* (p. 1-10). doi: 10.1109/OCEANS.2008.5151993
- Chen, Z. (2017). A review on robotic fish enabled by ionic polymer–metal composite artificial muscles. *Robotics and Biomimetics*, 4(1), 1–13.
- Clapham, R. J., y Hu, H. (2014). isplash-i: High performance swimming motion of a carangiform robotic fish with full-body coordination. En *2014 ieee international conference on robotics and automation (icra)* (pp. 322–327).
- Faudzi, A. A. M., Razif, M. R. M., Nordin, N. A. M., Natarajan, E., y Yaakob, O. (2014). A review on development of robotic fish. *Journal of Transport System Engineering*, 1(1), 12–22.
- Liu, J., y Hu, H. (2010). Biological inspiration: from carangiform fish to multi-joint robotic fish. *Journal of bionic engineering*, 7(1), 35–48.
- NOAA. (2021, febrero). *How much of the ocean have we explored?* <https://oceanservice.noaa.gov/facts/exploration.html>.
- Olcay, P. R. (s.f.). La robótica en los sistemas navales, actualidad y desafíos. *Revista de Marina N°*, 967, 72–77.
- Triantafyllou, M. S., y Triantafyllou, G. S. (1995). An efficient swimming machine. *Scientific american*, 272(3), 64–70.
- Zhou, C., Wang, L., Cao, Z., Wang, S., y Tan, M. (2008). Design and control of biomimetic robot fish fac-i. En *Bio-mechanisms of swimming and flying* (pp. 247–258). Springer.



## Lista de Acrónimos y Abreviaturas

<b>AUV</b>	Autonomous Underwater Vehicle.
<b>BCF</b>	Body and/or Caudal Fin.
<b>DC</b>	Direct Current.
<b>DOF</b>	Degrees Of Freedom.
<b>EEUU</b>	Estados Unidos.
<b>FAC</b>	Fish-like Aquatic Cruiser.
<b>IDE</b>	Integrated Development Environment.
<b>IPMC</b>	Ionic Polymer-Metal Composite.
<b>IUV</b>	Intervention Unmanned Vehicles.
<b>MIT</b>	Massachusetts Institute of Technology.
<b>MPF</b>	Median and/or Paired Fin.
<b>PWM</b>	Pulse-Width Modulation.
<b>ROS</b>	Robot Operating System.
<b>ROV</b>	Remotely Operated Vehicle.
<b>URDF</b>	Unified Robot Description Format.
<b>USV</b>	Unmanned Surface Vehicle.
<b>UV</b>	Unmanned Vehicles.
<b>WHOI</b>	Woods Hole Oceanographic Institution.
<b>XML</b>	eXtensible Markup Language.